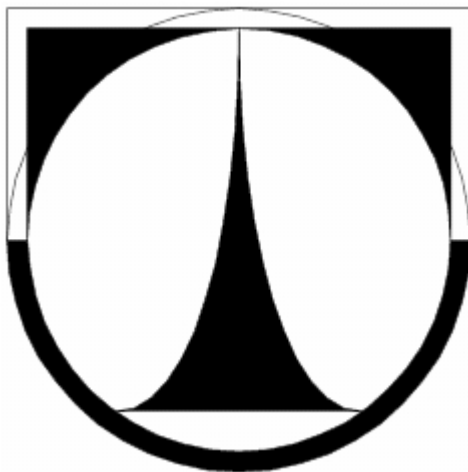


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA TEXTILNÍ



Studijní program: Textil B3107

Studijní obor: Textilní materiály a zkušebnictví 3107R011

Využití recyklovaných uhlíkových vláken
v geopolymerech

Using recycled carbon fibers in the geopolymers

Autor práce: Jiří Dušek
Vedoucí práce: Ing. Vladimír Kovačič

Počet stran textu: 48
Počet obrázků: 20
Počet tabulek: 13
Počet grafů: 9

Prohlášení

Jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se vztahuje zákon č.121/2000 Sb. o právu autorském, zvláště § 60 o školním díle.

Jsem seznámen s tím, že Technická univerzita v Liberci (dále TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci, nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o tomto faktu TUL. V takovém případě má TUL nárok pořadovat po mé osobě úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vytvořil samostatně s použitím uvedené literatury, internetových zdrojů a na základě konzultací s vedoucím této bakalářské práce.

V Liberci, dne:

.....

Podpis

Poděkování

Tímto chci poděkovat **Prof. Ing. Jiřímu Militkému**, CSc. za cenné rady, vedoucímu mé bakalářské práce **Ing. Vladimíru Kovačičovi** za vynikající vedení, trpělivost, laskavost a čas, který mi věnoval při tvorbě této práce. Dále bych rád poděkoval **Ing. Miroslavě Maršákové Ph.D.** za pomoc při měření elektrického odporu vzorků.

Současně bych rád poděkoval své rodině za pomoc a podporu při studiu.

Jiří Dušek

Abstrakt

Tato práce je zaměřena na další využití recyklovaných uhlíkových vláken v geopolymerech. Zkoumá možnosti zhodnocení stávajících mechanických vlastností přidavkem mletých uhlíkových vláken a zabývá se jejich vhodnou koncentrací v konečném kompozitu. Dále zkoumá možnosti využití mletých uhlíkových vláken jako vodivé součásti kompozitu.

Klíčová slova:

Uhlík, vlákno, kompozit, výztuž, matrice, recyklace, geopolymer, tlak, ohyb, elektrický odpor

Abstract

This work is focused on the further use of recycled carbon fiber in the geopolymers. Explores ways to improve the mechanical properties of the geopolymers by adding ground carbon fiber and wonder their proper concentration in the final composite. Further explore the use of milled carbon fiber as conductive components of the composite.

Keywords:

Carbon, fiber, composite, reinforcement, matrix, recycling, geopolymer, press, bend, electrical resistance

Seznam užívaných symbolů a zkratek.

σ [Pa]	napětí
F [N]	síla
m [kg]	hmotnost
l [m]	délka
S [m ²]	plocha
S_0 [m ²]	plocha vzorku před stlačením
h [m]	délka vzorku
h_0 [m]	délka vzorku před stlačením
δ_{po} [MPa]	pevnost v ohybu
$M_{0\ max}$ [N*m]	ohybový moment
E [MPa]	modul pružnosti v tahu
J [m ⁴]	modul setrvačnosti namáhaného vzorku
R [Ω]	elektrický odpor
ρ_v [Ω cm]	objemová rezistivita
CVI	chemical vapour infiltration (infiltrace chemických par)
PAN	polyakrylonitril
PES	polyester
PVA	polyvinylalkohol
PVC	polyvinylchlorid
PPR	Polypropylen pro výrobu instalačních trubek
PPS	poly-fenyl-sulfid
DMF	dimethylformamid
MPP	mesophase pitch (mezifázová smola)

Obsah

Úvod.....	9
1. Historie využití uhlíkových vláken.....	10
2. Vlastnosti a způsoby přípravy uhlíkových vláken.....	10
2.1 Vlastnosti uhlíkových vláken.....	10
2.2 Vnitřní uspořádání uhlíku a uhlíkových vláken.....	11
2.3 Výroba PAN vláken.....	12
2.4 Výroba uhlíkových vláken z PAN vláken.....	13
2.5 Výroba uhlíkových vláken ze smol.....	14
2.6 Úprava povrchu uhlíkových vláken.....	15
2.7 Zvláštní vlastnosti uhlíkových vláken.....	18
2.8 Druhy uhlíkových vláken.....	18
2.8.1 Diskontinuální vlákna porušená tahem (SBCF).....	19
2.8.2 Mletá uhlíková vlákna.....	19
3. Kompozitní materiály s vyztužením uhlíkovými vlákny.....	20
3.1 Forma výztuží v matrici.....	20
3.2 Užití polymerních matric v kompozitech s uhlíkovými vlákny.....	22
3.2.1 Termosetické matrice v kompozitech s uhlíkovými vlákny.....	22
3.2.2 Termoplastické matrice v kompozitech s uhlíkovými vlákny.....	23
3.2.3 Uhlíkové matrice v kompozitech s uhlíkovými vlákny.....	23
3.2.4 Keramické matrice v kompozitech s uhlíkovými vlákny.....	24
3.2.5 Kovové matrice v kompozitech s uhlíkovými vlákny.....	24
3.3 Synergický efekt.....	25

4. Recyklace opotřebených uhlíkových kompozitů.....	26
4.1 Recyklace termosetových kompozitů.....	26
4.1.1 Mechanická recyklace.....	27
4.1.2 Chemická recyklace.....	27
4.1.3 Tepelná pyrolýza.....	27
5. Využití recyklovaných uhlíkových vláken.....	28
5.1 Využití recyklovaných uhlíkových vláken jako součástí stavebních hmot.....	29
5.2 Využití recyklovaných uhlíkových vláken jako součástí termoplastů.....	29
6. Vlastnosti recyklovaných uhlíkových vláken.....	29
7. Geopolymery.....	30
7.1. Složení geopolimerů.....	31
7.2 Vlastnosti geopolimerů.....	31
7.3 Materiály užívané pro přípravu geopolimerů.....	32
7.3.1 Pucolán – metakaolin.....	32
7.3.2 Popílek.....	32
7.4 Alkalická aktivace.....	33
7.4.1 Alkalické aktivátory.....	33
8. Experimentální část.....	34
8.1 Příprava zkušebních vzorků.....	34
8.1.1 Příprava jednotlivých směsí.....	35
8.1.1.1 Použitý geopolimer – Baucis.....	35
8.1.1.2 Mletá uhlíková vlákna.....	36
8.2 Přístroje použité při výrobě vzorků, testovací přístroje.....	37

8.2.1 Mlýnek na vlákna.....	38
8.2.2 Stojanová míchačka Heidolph RZR 2020.....	38
8.2.3 Vibrační vysokofrekvenční stolek VSB - 15.....	39
8.3 Mechanické zkoušky.....	39
8.3.1 Pevnost v tlaku.....	40
8.3.1.1 Označení mechanických vlastností při zkoušce tlakem.....	40
8.3.1.2 Vlastní zkouška tlakem.....	41
8.3.2 Zkouška ohybem.....	42
8.3.2.1 Vlastní zkouška ohybem.....	44
8.4 Měření elektrického odporu geopolymeru.....	45
8.4.1 Vlastní měření elektrického odporu geopolymeru s C – partikulemi.....	46
9. Výsledky experimentu.....	48
9.1.1 Pevnost v tlaku - lineární regrese (polynom 2.stupně).....	49
9.1.2 Tabulka výsledků – pevnost v tlaku.....	50
9.2.1 Pevnost v ohybu- lineární regrese (polynom 2.stupně).....	51
9.2.2 Tabulka výsledků – pevnost v ohybu.....	52
9.3 Výsledky měření elektrického odporu.....	53
10. Závěr.....	56
11. Seznam použité literatury.....	57

Úvod

Uhlíková vlákna se v praxi používají již několik desetiletí. Aplikace, kde byly využity se ale časem dostávají na hranici životnosti a tudíž dochází k jejich demontážím. Demontované díly můžeme skládkovat, což je možnost neekologická a hlavně neekonomická, nebo se je můžeme pokusit dále využít. Výhodou dalšího využití je fakt, že uhlíková vlákna i po dlouhé době používání nedegradují natolik, aby jejich vlastnosti nedovolovaly jejich zařazení do nových aplikací. Navíc jejich výroba není zcela levná, takže jejich dalším využitím nedochází ke zbytečným finančním ztrátám.

Tato bakalářská práce se zaměřuje na využití recyklovaných uhlíkových vláken v geopolymerech. Zaměřuje se na možnosti zlepšení stávajících mechanických vlastností geopolymery Baucis přidáním mletých uhlíkových vláken, přičemž hledá nejvhodnější koncentraci uhlíkového přídatku v kompozitním vzorku. Dále zjišťuje pohyby elektrické rezistivity geopolymery Baucis s přídatkem rozdílného množství mletých uhlíkových vláken.

1. Historie využití uhlíkových vláken

K prvnímu použití uhlíkových vláken došlo roku 1879 při konstrukci žárovky, jako materiálu pro výrobu vlákna uvnitř skleněné baňky se užívalo zuhelnatělého odštěpku bambusového dřívka, který se projevil jako nejlepší materiál pro dané využití – tato žárovka dosáhla životnosti až 600 hodin. Dnešní klasické žárovky, které mají vlákno s wolframu, dosahují životnosti v průměru kolem 1000 hodin. [6]

Průmyslová výroba uhlíkových vláken byla zahájena v roce 1957, jako prekurzor byla využita viskóza, bohužel tato metoda má malou výtěžnost (cca jen 25%) a používá se v provozech, které nedisponují moderním vybavením, nebo neznají modernější technologie výroby. Od roku 1971 se v Japonsku (společnost Toray) začalo s průmyslovou výrobou uhlíkových vláken karbonizací vláken polyakrylonitrilových. Tato metoda se používá dodnes a je jí vyrobeno na 90% světové produkce uhlíkových vláken (cca 45 000 tun). Roku 1976 se uhlíková vlákna začínají vyrábět i z mezofázových smol, tyto vlákna mají lepší tepelnou vodivost a výrazně vyšší modul pružnosti. V 90. letech začíná výroba uhlíkových vláken z fenol-aldehydových prekurzorů, takto vyrobená vlákna mají lepší přilnavost k pryskyřicovým matricím. [3]

2. Vlastnosti a způsoby přípravy uhlíkových vláken

Tato část se zabývá vlastnostmi uhlíkových vláken, různými způsoby příprav, jejich zušlechťováním a vybrané typy vláken popisuje.

2.1 Vlastnosti uhlíkových vláken

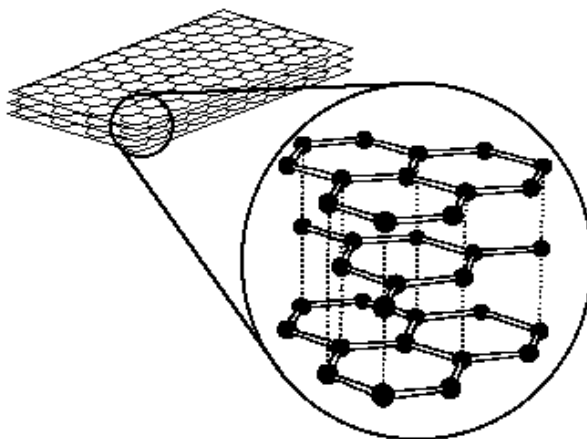
Uhlíková vlákna obsahují 93-95% čistého uhlíku uspořádaného ve vrstvách. Hustota uhlíkových vláken se pohybuje v rozmezí $1800-2000 \text{ kg/m}^3$ a i při této vcelku malé hustotě si vlákna udržují širokou škálu mechanických vlastností. Struktura se odvíjí od druhu zvoleného výchozího materiálu, způsobu jeho zpracování a teplotě pyrolýzy.

2.2 Vnitřní uspořádání uhlíku a uhlíkových vláken

V kolmém směru k basálním rovinám šesterečné mřížky je uhlík vysoce anizotropní – působí zde jenom malé Van der Waalsovy síly. Na druhou stranu v rovinách basálních vrstev (aromatických rovinách) jsou atomy vázány vysoce pevnými kovalentními vazbami. Grafitový monokrystal má teoretickou pevnost při namáhání tahem ve směru rovnoběžném s bazálními rovinami cca 100 GPa. Teoretický modul pružnosti v tahu činí cca 1000 GPa. Polykrystalický grafit s nahodile orientovanými krystaly je drobný a velice měkký. Jeho pevnost v tahu je 20 MPa a modul pružnosti v tahu je 10 GPa. Pevné kovalentní vazby mezi atomy uhlíku se v bazálních rovinách neporušují ani při působení smykové síly a mohou se bez většího odporu pohybovat proti sobě. Tato vlastnost se využívá při mazání grafitem. [4]

Samotná uhlíková vlákna využívají vysokou tuhost a pevnost aromatických rovin. Bazální roviny jsou orientovány rovnoběžně s osou vlákna, aromatické roviny jsou nahodile umístěny vedle sebe v turbostratickém uspořádání. To způsobuje mírně větší vzdálenosti mezi aromatickými rovinami (0,34 – 0,345 nm) než u mřížky grafitu (0,335nm). [5]

Krystaly turbostratického uhlíku jsou protáhlé ve směru osy vlákna. U vláken vyrobených z PAN jsou tvořeny vždy několika paralelními aromatickými rovinami. V příčném průřezu vlákna nedosahují pásy větších rozměrů a jsou nahodile stočeny. V podélném řezu vláknem jsou mikrokristaly natočeny pod malými úhly – pás rovnoběžných aromatických rovin je zvlněný. Mikrokristaly v pásích lze sledovat rentgenovou metodou, jejich délka se pohybuje v rozmezí 10 – 50 nm. Z tloušťky pásů zjistíme transmisním elektronovým mikroskopem počet paralelních aromatických rovin, ten se pohybuje v rozmezí mezi 10 a 30. Mikroskopické póry jsou orientovány v podélné ose vlákna. Dále vlákno obsahuje submikroskopické dutiny mezi jednotlivými mikrokristaly, ty mají v příčném řezu rozměr okolo 3nm. Od podélné osy se aromatické roviny mikrokristalů odklánějí jenom minimálně, což má za následek malý modul pružnosti, přesto je ale větší než u oceli. Tuto vysokou pevnost (až 7000 MPa) zaručuje malý počet defektů mezi jednotlivými mikrokristaly. [4]



Obr.1 Hexagonální vrstvená struktura [1]

2.3 Výroba PAN vláken

Polyakrylonitril vzniká radikálovou polymerací akrylonitrilu ($\text{CH}_2 = \text{CH} - \text{CN}$). Zvlákňuje se třemi základními způsoby: za mokra, za sucha a kombinací (tzv. metoda DRY-JET-WET). Za sucha se PAN zvlákňuje z polymerního roztoku v DMF, při teplotním rozmezí 80-150°C. Vlákná prochází zvlákňovací šachtou, do které se vhání vzduch temperovaný na teplotu 230°C. Poté dochází k jejich promývání vodou a dloužení (dloužicí poměr 6-10) za teploty 140°C. Následuje stabilizace, která se provádí na vzduchu při teplotě 140°C nebo v páře při 115°C. Druhá metoda zvlákňování se provádí tzv. mokrou cestou. Zvlákňuje se z koagulační lázně s vodou a DMF, při teplotě 20- 30°C. Vzniklá vlákna mají fibrilární pórovitou stavbu. Dloužení probíhá ve vodě za varu, dloužicí poměr je 2-3x , tím narůstá orientace a fibrilární uspořádání. Následné sušení probíhá ve volném stavu a při konstantní délce, dochází k zániku velké části pórů. Třetí metoda zvlákňování se nazývá DRY-JET-WET, je to kombinovaná metoda mokré a suché zvlákňovací cesty, kdy se zvlákňuje do vzduchu, ze kterého polymer přechází do koagulační lázně. [1]

2.4 Výroba uhlíkových vláken z PAN vláken

1. Stabilizace vlákna

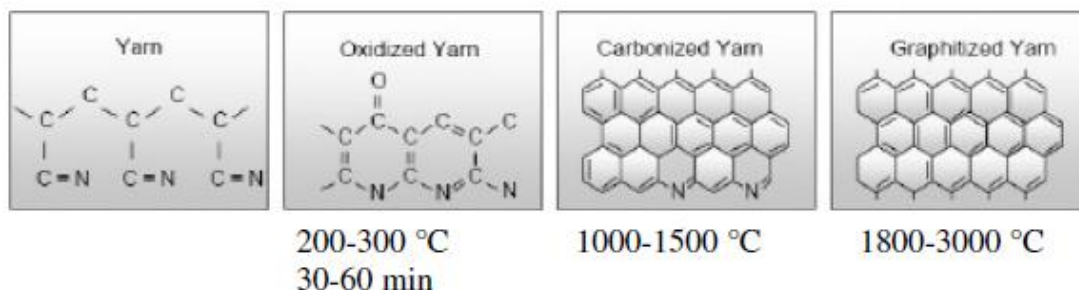
Provádí se v teplotním rozsahu 200 – 300°C v oxidačním prostředí za stálého tahového napětí. V řetězci makromolekuly dochází k zacyklení monomerních jednotek – vznikají makromolekuly s paralelně žebříčkovitou strukturou. Makromolekuly zesilují kyslíkové můstky, jak je patrné z obr.1. Díky této úpravě se vlákno stává netavitelným. [4,5]

2. Karbonizace

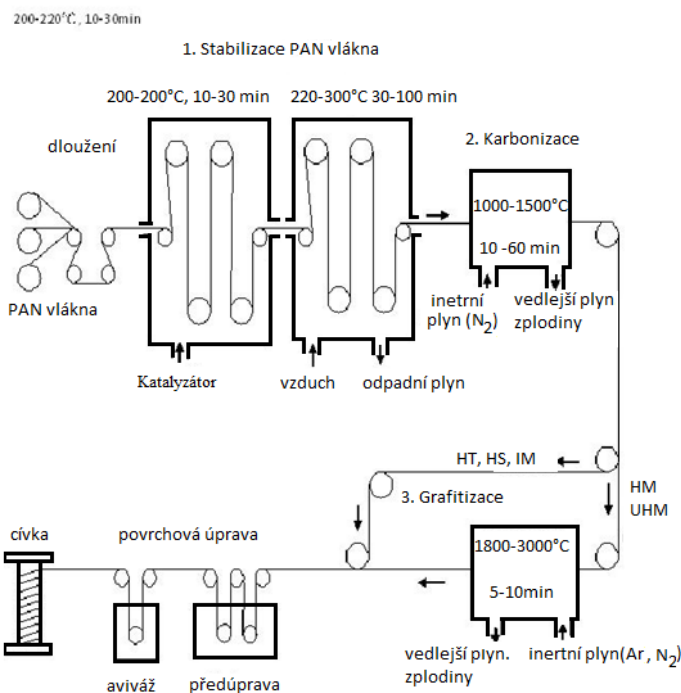
Provádí se při teplotách od 1000 do 1500°C v inertním prostředí čistého dusíku. Při těchto teplotách se odstraní vodík a sníží se obsah kyslíku a dusíku, vlákno nyní obsahuje 80 - 95% uhlíku – zkarbonizuje. Po této operaci dosahuje se zvyšují u vláken pevnosti v tahu.[4,5]

3. Grafitizace

Provádí se v teplotním rozsahu 1800 – 3000°C v inertním prostředí Ar nebo N₂. Dochází k dalšímu zvětšení obsahu uhlíku a zkvalitnění mikrokrystalů, čímž se zvětší tuhost vlákna. Klasická C-vlákna z PAN vláken reagují na zvětšení tuhosti snížením své pevnosti, je to způsobeno zvětšením mikrokrystalů, čímž dojde i ke zvětšení defektů mezi nimi. Vysokotuhá vlákna se při grafitizaci ještě dlouží – zmenší se úhel odklonu mikrokrystalů od středové osy vlákna. Takové vlákna označujeme jako vysokomodulová. [4,5]



Obr.2 Změny struktury PAN při výrobě uhlíkových vláken [4]



Obr.3 Schéma výroby uhlíkových vláken z PAN [10]

2.5 Výroba uhlíkových vláken ze smol

Nejtužší uhlíková vlákna se vyrábí ze smol, což jsou zbytky po destilaci ropy a uhlí. Vysoce pevná a zároveň tuhá vlákna se vyrábí pouze z takzvaných mezofázových smol - jedná se o smoly s kapalnými krystaly (angl. MPP – MesoPhase Pitch) [4]. Aromatické roviny rozdílné molekulové hmotnosti jsou v mezofázových smolách paralelně uspořádány, takže krystaly obsahuje i smola v tekutém stavu. [5]

Po zahřátí na stanovenou teplotu se smola stává viskózní, v tomto stavu se také zvláknuje, aromatické roviny se začínají orientovat podél středové osy vlákna. Jako další operace následuje stabilizace vlákna, předkarbonizace, karbonizace a operace se ukončují grafitizací, která je u vybraných vláken doprovázena dlužením - jedná se o vlákna s nejvyšším modulem pružnosti (VHM Very High Modulus, UHM Ultra High Modulus). Vlákna ze smol mají též jinou mikrostrukturu. Aromatické roviny u vláken ze smol mají rozmanitější deskové krystaly turbostratického uhlíku, nedochází ke zvlnění aromatických rovin, jelikož krystaly jsou téměř paralelní s osou vlákna. Jejich uspořádání v příčném řezu je radiální, nahodilé, snopkovité nebo smíšené. Vlákna ze

smol mají též vedle deskovitých krystalů turbostratického uhlíku mikroskopické póry ve tvaru polyedrů, menší turbostratické mikrokristaly a polykrystalický grafit. [3,4,5]

Nejtužší vyráběná vlákna z mezofázových smol dosahují modulu pružnosti v tahu až hodnoty 965 GPa. Vysoká pevnost vláken ze smol je určena malou mírou defektů v mikrostruktuře, modul pružnosti v tahu je dán dokonalostí a velikostí mikroskopických krystalů a úhlu odchýlení aromatických rovin od vlákenné osy. U vysoce tuhých, grafitizovaných vláken z mezofázových smol s kruhovým průřezem se musí během výroby dát pozor na pozvolné ochlazení, přílišná rychlost zchlazení totiž může zapříčinit vysoké pnutí ve vláknu, čímž může dojít k jeho degradaci – podélnému popraskání. Zdokonalením technologie výroby se však dokázalo podobným jevům zabránit. Velmi dobrých parametrů tuhosti a zároveň pevnosti bylo dosaženo u vláken s oválným průřezem, je to zapříčiněno mikrostrukturou polyedricky tvarovaných shluků aromatických vrstev na vzdálenějších koncích oválného řezu v místech, kde vzniká lom. Rozměrnější deskovité krystaly uvnitř oválného průřezu nesměřují radiálně od osy vlákna, ale jsou uspořádány rovnoběžně k širším stranám průřezu oválu, tímto uspořádáním vlákno získává na tuhosti. Smola se také může vytlačovat různými druhy trysek, které mohou dát vlákennému průřezu mnoho jiných tvarů. [4,5]

2.6 Úprava povrchu uhlíkových vláken

Hotová uhlíková vlákna se po vyrobení dále povrchově upravují.

Důvody povrchové úpravy:

- 1) Odstranění nežádoucích látek z povrchu, které by bránily kontaktu s matricí.
- 2) Odstranění adsorbce plynů na povrchu vláken.
- 3) Ochrana vláken před vzájemným poškozením povrchu.
- 4) Zvýšení přilnavosti povrchu k vazebným prostředkům a matricím.

V případě malé reaktivity ploch aromatických rovin dochází k zvýšené reaktivitě jejich hran a rohů [4]. Váží na sebe kyslík, oxidy uhlíku, karboxylové kyseliny, hydroxidové, karbonylové, kyanové a aminové skupiny. Plynné látky a vlhkost poté mohou

způsobovat problémy při výrobě kompozitních výrobků, protože jsou na vlákne pouze fyzikálně vázány. To způsobuje defekty v kompozitu při jeho vytvrzování (za zvýšené teploty), dochází k odpařování těchto látek, což způsobuje malé bublinky uvnitř na vlákne, v prostoru i na povrchu kompozitu. [4,5]

Tomuto jevu zabraňujeme:

- 1) Úpravou povrchu vlákna.
- 2) Odplyněním povrchu vlákna vakuovou desorbci.
- 3) Smísením cizích příměsí s matricí vhodným technologickým způsobem.

Mezi nejčastější způsob ochrany povrchu uhlíkových vláken se řadí ochrana polymerními povlaky, zejména na epoxidové bázi. Tyto povlaky zabraňují abrazi povrchu a adsorbci nežádoucích látek. U vláken s aromatickými rovnoběžnými rovinami s povrchem (PAN) je zapotřebí zdrsnit povrch a zvýšit jeho reaktivitu. Tato úprava se provádí buďto suchou, nebo mokrou cestou. Mokrý cesta (jedná se o čistě chemický proces) se používá častěji, provádí se oxidací HNO_3 , H_2CrO_4 , Na_2ClO_2 . Další z používaných způsobů je elektrochemický, využívající anodické oxidace vláken v elektrolytu, například v sulfidu amonném. Suchý způsob, termicko - oxidační lze používat pouze u vláken s vhodnou mikrostrukturou (omezený počet). [5]

Mezi nejnověji používané metody ochrany uhlíkových vláken se zařadila úprava studeným vysokofrekvenčním plazmatem. Plazma je vytvářeno reaktorem napájeným střídavým proudem o frekvenci 15MHz. Podle prostředí v němž je operace prováděna (argon, kyslík, amoniak, aj.) se dosahuje různých vlastností a účinků. Jedná se například o:

- 1) Zdrsňování povrchu, což může při použití kyslíku zapříčinit i snížení pevnosti.[4]
- 2) Očištění vláken zvyšuje povrchovou energii, při užití argonu se zvyšuje smáčivost v pryskyřicích.[4]
- 3) Implementace funkčních skupin na povrch, například při užití amoniaku jde o aminy.[4]

4) Polymerace povrchu vláken, kdy se do proudu plynu přidává vhodný monomer. Při tomto ději dochází k ionizační, disociační a rekombinační reakci atomů plynů a monomerů, čímž dochází k připojení vznikajících polymerů na povrch vláken.[4]

Plazmové zpracování uhlíkových vláken s přidavkem amoniaku, popřípadě ještě směsí amoniaku a argonu, se velice osvědčilo v epoxidových matricích. Bylo dosaženo téměř dvojnásobné smykové pevnosti na rozhraní vlákno-matrice. Plazmovou polymerací jde vytvořit na povrchu uhlíkového vlákna polymerní film (např. polypropylenový), čímž se dosáhne vynikající afinity k polymerní matrici. Po implementaci polymerních skupin na povrch vlákna může dojít ke zvětšení jeho tahové pevnosti – tento efekt je vysvětlen překrytím defektů naneseným polymerem na povrch vlákna. Na očištěný povrch se mechanicky, chemicky i fyzikálně lépe váží funkční skupiny nanášené za mokra. Používají se polyimidy rozpuštěné v organických rozpouštědlech a oligomery na bázi epoxidů. Dále se dají použít blokové polymery, které nemají přirozenou afinitu k povrchu vlákna, ale k polymerní matrici. [4,5]

Kompozity z takto očištěných a upravených uhlíkových vláken mají ve smyku vysokou pevnost na rozhraní matrice - vlákno i velkou interlaminární smykovou pevnost. Pokud se ještě použije mezifáze tvárné polymerní vrstvy, dojde ke zlepšení odolnosti kompozitu proti nárůstu množství vad v podobě podélných trhlin na rozhraní matrice-vlákno. Při použití lubrikantů (PVA) nebo silikonů dochází ke zhoršení nebo nemožnosti spojení vláken a matrice, zvětšuje se ale schopnost pohlcení rázu. Vlákná se z matrice snadno vytahují, čímž pohlcují energii a nedochází k jejich porušení v rovině lomové trhliny. Samotné vytahování vláken z matrice pohlcuje většinou více energie, než je spotřebováno při tvorbě lomových povrchů vláken. Pokud chceme zachovat dobrou soudržnost kompozitu a houževnatost, lze povrch vláken ošetřit například kaučukem, který zvyšuje tření při vytahování vláken z matrice. Pro vysokou statickou pevnost kompozitu a dobrou únavovou odolnost jsou jakékoli nevratné děje odehrávající se v mezifázovém prostředí matrice-vlákno naprosto nepřijatelné.[3,4,5]

2.7 Zvláštní vlastnosti uhlíkových vláken

- 1) Anizotropie mechanických vlastností - modul pružnosti ve směru kolmém k ose vlákna (na úrovni hodnot polykrystalického grafitu) je výrazně nižší.
- 2) Křehkost – destrukce nastává po mnohem menším prodloužení než u jiných druhů vláken (např. skleněných) z toho vyplývá i větší minimální poloměr při ohybu vláken
- 3) Záporný koeficient délkové teplotní roztažnosti α – při zahřátí má vlákno tendenci ke srážení. Ve směru kolmém na osu vlákna má α kladnou hodnotu a je větší než např. u vláken skleněných
- 4) Elektrická vodivost - odpor u uhlíkových vláken je malý v podélném směru a to i u nejtužších vláken ($1.9 \cdot 10^6 \Omega/\text{m}$). [4]

2.8 Druhy uhlíkových vláken

Rozdělení uhlíkových vláken dle mechanických vlastností:

- 1) Karbonizovaná vlákna s dobrou pevností v tahu a středním modulem pružnosti (HS High strength, AS Average strength, HT High tenacity). Tato vlákna mají modul pružnosti v tahu 230 – 300 GPa, pevnost v tahu dosahuje 4 – 7 GPa.[3,5]
- 2) Vysoce grafitizovaná vlákna (HM High modulus). Tato vlákna mají modul pružnosti nad hranicí 400 GPa a jejich pevnost se pohybuje v rozsahu 2,4 – 4 GPa.[3,4,5]
- 3) Vysoce pevná vlákna se středním modulem pružnosti (IM Intermediate modulus). Tato vlákna mají modul pružnosti v tahu nad hranicí 300 GPa a jejich pevnost bývá vyšší než 4 GPa.[3,5]
- 4) Vlákna s vysokým modulem pružnosti (VHM Very high modulus, UHM Ultra high modulus). Tato vlákna mají modul pružnosti nad hranicí 550 GPa, pevnost se pohybuje v rozmezí 2,5 – 5 GPa.[3,5]

Dle dalších vlastností se dělí kromě kontinuálních vláken uvedených výše na:

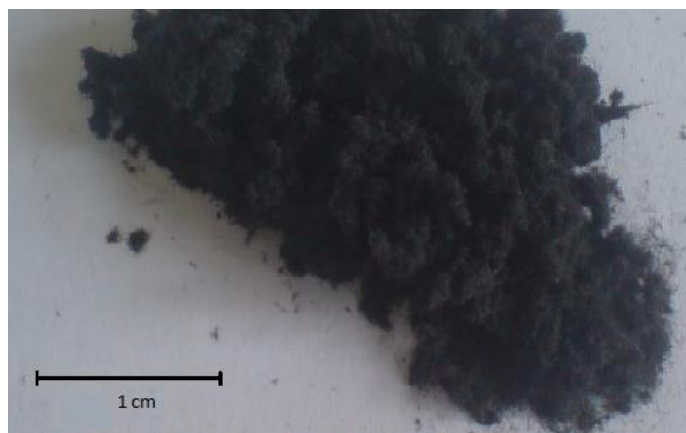
- 1) Diskontinuální vlákna porušená tahem (SBCF Stretch-broken carbon fiber)
- 2) Mletá uhlíková vlákna
- 3) Dutá uhlíková vlákna
- 4) Recyklovaná uhlíková vlákna

2.8.1 Diskontinuální vlákna porušená tahem (SBCF)

Nedostatečná tvarovatelnost klasických prepregů s kontinuálními výztužnými vlákny pro kompozitní materiály (jednosměrné, tkaninové atd.) vedla k vývoji takových prepregů, která obsahují diskontinuální uhlíková vlákna (SBCF). Délka jednotlivých vláken dosahuje požadovaných mechanických vlastností a přitom je prepreg dostatečně tvarovatelný i na obtížněji profilovaných místech (prohlubně, výstupky, hrany). Zlepšení tvarovatelnosti je zapříčiněno nezávislým pohybem jednotlivých svazků vláken uvnitř matrice. [4,5]

2.8.2 Mletá uhlíková vlákna

Mletá uhlíková vlákna jsou vhodným plnivem pro většinu druhů pryskyřic, vlákna jsou namleta na částice v délkovém rozmezí 50 – 450 mikrometrů. Zlepšují mechanické hodnoty výsledného kompozitu, jeho rozměrovou stálost a zároveň zajišťují svod elektrostatického náboje.



Obr.4 Mletá uhlíková vlákna (foto autora)

3 Kompozitní materiály s vyztužením uhlíkovými vlákny

Hlavní využití uhlíkových vláken spočívá v jejich užití jako součásti kompozitních materiálů. Výsledné vlastnosti ovlivňují vlastnosti samotných uhlíkových vláken, vlastnosti matrice a způsob uložení vláken v matrici. Materiál užitý pro matrici se liší podle potřeby užití výsledného kompozitu, jedná se například o míru odolnosti za zvýšené teploty, nebo odolnost vůči chemicky agresivnímu prostředí. Stejným způsobem se vybírají i vhodná vlákna pro danou matrici. Výsledný kompozit nemusí být tvořen pouze samotnou matricí a uhlíkovými vlákny, lze přidat i jiná vlákna (skleněná, aramidová), a tím dosáhnout požadovaných vlastností kompozitu.

Hlavní funkce matrice:

- 1) Držet vlákna na správné pozici
- 2) Společně s vlákny přenášet napětí
- 3) Ochránit vlákna před abrazním poškozením
- 4) Zabezpečit pevnost mezi jednotlivými lamelami
- 5) Zajišťovat chemické a elektrické vlastnosti [7]

3.1 Forma výztuží v matrici

Formy výztuží jsou pro většinu vláken zpracovávaných do kompozitních materiálů stejné, musí odpovídat technologickým možnostem výrobce nebo dalšího zpracovatele. Výztuž může být ve formě malých částic, krátkých vláken, jednotlivých dlouhých vláken, nebo jejich pramence. Průměrný pramenec obsahuje 200 – 400 vláken. U výrobků které jsou jednosměrně orientované – např. tyčí a jednosměrných prepregů se využívají právě tyto typy vyztužených vláken. Pokud má však výsledný kompozit být namáhán vícesměrně, tak vícevrstvé kladení jednosměrných vrstev je technologicky nevýhodné (pultruze, navíjení). V těchto případech jsou jako výztuže používány tkaniny, rouna, pleteniny a rohože. Další výhodou používání těchto výztuží je snadnější manipulace, zvýšení odolnosti proti šíření křehkých lomů, a rychlejší nárůst tloušťky stěny kompozitu při výrobě. Vlastnosti FRC (fiber reinforced composite) s obsahem

těchto výztuží se stávají tzv. kvazi izotropní, nevýhodou je zvýšení tloušťky stěny kompozitu. [8]

kompozit



Obr.5 Formy výztuží v kompozitech [8]

Formy výztuže:

- 1) **Částicová:** Výztuž je tvořena malými částicemi, kde jeden rozměr nepřesahuje ostatní rozměry.
- 2) **Krátká vlákna:** Výztuž je tvořena krátkými úseky nasekaných vláken, vlákna jsou nahodile orientována.
- 3) **Roving:** Výztuž tvoří nekonečná, nezakroucená vlákna. Pramenec je tvořen jednotlivými vlákny navinutými na cívku. Využívá se u většiny pultrudovaných výrobků.
- 4) **Výztužovací rohož:** Výztuž je tvořena krátkými a středně dlouhými vlákny rovingu (vlákna jsou dle potřeby nasekána), která jsou na svém povrchu naimpregnovány termoplasty či pryskyřicemi (impregnace tvoří 5-30% hmotnosti kompozitu). Maximální zaplnění kompozitu je limitováno nahodilým položením rovingových vláken, což vede ke snížení pevnosti a tuhosti kompozitu, výhodou však jsou kvaziizotropické vlastnosti v ploše. Vlastní výroba kompozitu je realizována tepelným lisováním do ploché kontinuální rohože.
- 5) **Tkanina:** Tkané výztuže se vyrábí stejným způsobem jako klasické textilie, jako materiál pro osnovu a útek je použit roving. Tato metoda má dvě zásadní výhody,

první výhodou této metody je možnost ovlivnění plošných vlastností kompozitu vhodným výběrem tkané vazby. Druhou výhodou je vyšší obsah vláken ve vrstvě kompozitu, což má za následek vyšší tuhost a pevnost.

6) Povrchová rohož: na rozdíl od vyztužovací rohože má povrchová rohož jemnější strukturu a nižší plošnou hmotnost (často se využívá PES), důvod využití je také zcela jiný. Její primární účel není vyztužení kompozitu, ale estetické upravení povrchu (lze opatřit vzorováním), které může být zároveň spojeno s ochranou povrchu před UV zářením. [9]

3.2 Užití polymerních matic v kompozitech s uhlíkovými vlákny

Při výrobě kompozitů s polymerní maticí se velice často využívají takzvané prepregy (preimpregnated fibers). Jedná se o textilní materiál (vlákna, tkanina, aj.) upravený do požadovaného tvaru, navrstvený do potřebné tloušťky, který je předem impregnován pryskyřicemi. Při zpracování na výsledný produkt se prepreg vytvaruje do potřebného tvaru a termicky se v něm zafixuje (při užití epoxidových pryskyřic v teplotním rozmezí 120 – 180°C). Prepregů lze využít i pro výrobu uhlíkových kompozitů s maticí na bázi termosetů a termoplastů, lze však využít i jiné druhy matic např. uhlíkové, kovové keramické a skleněné. [9]

3.2.1 Termosetické matrice v kompozitech s uhlíkovými vlákny

Pro výrobu matic v kompozitech s uhlíkovými vlákny se nejčastěji využívají tavitelné epoxidové pryskyřice, jedná se asi o 90% celkové produkce. Ve spojení s vhodnými uhlíkovými vlákny tvoří kompozit s vynikajícími mechanickými vlastnostmi, který je odolný proti chemickému poškození. Dále se užívají vinylesterové pryskyřice, které mají horší mechanické vlastnosti, ale jsou chemicky stabilnější a snáze se zpracovávají. Fenolické pryskyřice, které jsou odolné vůči teplotám (230°C), kyselinám a dobře se zpracovávají. Nejlepší teplotní rezistenci mají bismaleimidové a polyimidové pryskyřice až 280°C. [4,9,11]

3.2.2 Termoplastické matrice v kompozitech s uhlíkovými vlákny

Pro výrobu těchto matric se využívají amorfni a semikrystalické termoplasty, jejich výhodou oproti termosetickým pryskyřicím je vyšší houževnatost. Ta je způsobena volnější strukturou materiálu, kdy se jednotlivé řetězce mohou (v omezené míře) po sobě pohybovat. Dalšími výhodami termoplastů je rychlejší proces výroby (odpadá čas potřebný na vytvrzení), možnost svařování a dobré chování za vlhka a vyšších teplot (neuvolňují toxické látky). Uhlíkovými vlákny se efektivněji vyztužují semikrystalické termoplasty, vlastní vlákna slouží jako nukleační body, které jsou obklopeny jemnou mikrokrystalickou strukturou. Toto chování zajišťuje vyšší modul pružnosti. U amorfních matric uhlíková výztuž výrazně zlepšuje creepové chování (tečení). [4,9,11]

3.2.3 Uhlíkové matrice v kompozitech s uhlíkovými vlákny

Hlavní způsob výroby uhlíkových matric je pyrolýza vhodných tuhých, plynných nebo tekutých organických materiálů, který může být i dále grafitovatelný. Do uhlíkových matric se přidávají všechny typy výztuží (rovingy, rohože tkaniny, atd.), záleží na výsledné aplikaci kompozitu. Pro vytváření těchto matric jsou stěžejní dva druhy výroby. Při první se využívá působení plynu bohatého na uhlík (metoda CVI - chemical vapour infiltration) a může se aplikovat několika způsoby – izotermicky, s tepelným gradientem, tlakovým gradientem aj. Druhá metoda spočívá v napouštění výztuže kompozitu tekutou fází, jedná se o termoplastickou nebo teplem tvrditelnou pryskyřici, nebo pryskyřici na bázi smol. Matrice poté prochází pyrolýzou. I druhá metoda se může aplikovat několika způsoby – izostaticky, za zvýšeného a sníženého tlaku, nebo v kombinaci s první metodou CVI. Z důvodu extrémních podmínek, v kterých jsou tyto kompozity používány, vzniká potřeba ochránit je před oxidací. Jako inhibitoru koroze se využívá oxidu boritého (B_2O_3), v kombinaci s jeho povrchovým ošetřením karbidem křemíku (SiC) ochrání kompozit až do teploty $1500^{\circ}C$, ve směsi SiC s SiO_2 chrání kompozit až do teploty $1700^{\circ}C$, tato ochrana se v průmyslu využívá nejčastěji. Dále se k zamezení přístupu kyslíku využívá iridium, které se nanáší na souvislém povlaku. Tímto ošetřením je uhlík rezistentní až k teplotě $2100^{\circ}C$, iridium je však relativně drahé a jeho nános je technologicky náročný. Všechny tyto způsoby ochrany se také dají kombinovat s ohledem na požadované vlastnosti kompozitu. [11]

3.2.4 Keramické matrice v kompozitech s uhlíkovými vlákny

Keramické matrice rozdělujeme do dvou skupin – oxidických a neoxidických a zahrnují materiály: Al_2O_3 , SiO_2 , MgO , SiC , AlN , ZrO_2 , Si_3N_4 , BN , B_4C , TiB_2 , atd. Uhlíková vlákna v těchto kompozitech mají několik funkcí, jedná se o celkové vyztužení, ochranu proti teplotním rázům, snížení hustoty a zvýšení tepelné vodivosti. Použitá uhlíková vlákna musejí být povrchově ošetřena proti oxidaci a musí u nich být zajištěna dostatečná přilnavost k matici. Mezi rozšířenější použití se řadí kompozity s maticí z SiO_2 zpevněné uhlíkovými vlákny, fosforečnanem boritým a β -spodumenum modifikovaným alkalickými kovy. Díky své minimální tepelné roztažnosti a dobré tepelné vodivosti se výsledné kompozity využívají jako zrcadla ve vysokoenergetických laserech. Kompozity se skleněnou maticí se zatím nacházejí ve stádiu vývoje, výzkum se zaměřuje na využití stávajících a hledání nových materiálů, snížení tepelných rázů, snížení křehkosti. Kompozity se skleněnou maticí se mají využívat ve vakuu jako samomazné. [11]

Uhlíková vlákna se dají také využívat jako výztuž betonů. Dle potřeby se upraví délka rovingových vláken, popřípadě se takto dají využít odpadová uhlíková vlákna vzniklá při výrobě. Vlákna se v betonu volně rozmisťují, nebo se uspořádají dle potřeb materiálu. Kromě celkového zpevnění směsi dochází i ke snížení elektrického odporu betonu, a tím ke zvýšení elektromagnetického stínění. Při koncentraci krátkých vláken v rozmezí 0,2-0,5% lze sledovat díky změnám elektrického odporu, mechanické pohyby budovy, popřípadě vznik deformací. Další využití uhlíkových kompozitů v betonu tkví v záměně klasického ocelového armování za armování z uhlíkového kompozitu. Výhodou bude odlehčení konstrukce, zvýšení pevnosti a odpadnou potíže s korozí armovacích drátů. [4,11]

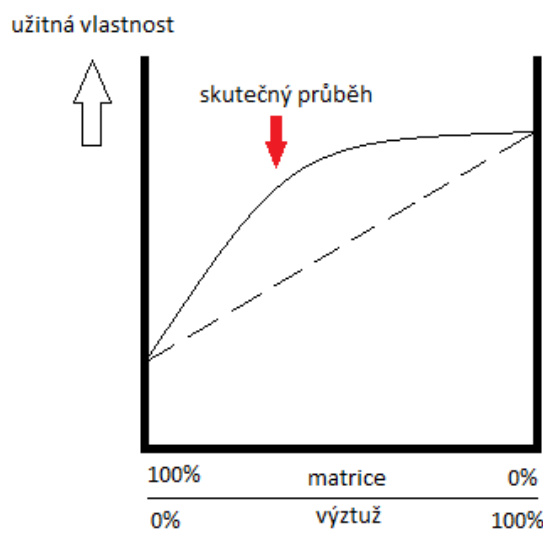
3.2.5 Kovové matrice v kompozitech s uhlíkovými vlákny

Využití kovových matric společně s uhlíkovými vlákny je zatím ve stádiu pokusů, přináší však slibné výhledy směrem k dobrým vlastnostem nových materiálů. U těchto materiálů by mělo dojít ke zvýšení pevnosti a modulu pružnosti za zvýšených teplot,

snížení hustoty, zlepšení únavové rezistence a creepového chování a zvýšení odolnosti proti opotřebení. Pro výzkum se užívají slitiny z těchto materiálů: AL, Mg, Ni Ti,Cu, atd. [11]

3.3 Synergický efekt

Základní vlastnosti každého kompozitního materiálu se odrážejí od synergického chování jeho složek. Výsledné hodnoty jednotlivých vlastností v kompozitu mohou být vyšší, než jsou maximální možné hodnoty jednotlivých složek (mimo kompozit). Výsledek se nerovná poměrnému sečtení jednotlivých vlastností. Synergické chování se vysvětluje složitou strukturou kompozitních materiálů. Rozhodující podnět tohoto chování může vycházet z makrostruktury i mikrostruktury. Vrstvy s diametrálně odlišnou mikrostrukturou a chováním na rozhraní konstituentů mají jiné vlastnosti než vnitřní oblasti jednotlivých konstituentů. Z toho vychází, že kompozitní materiál se skládá ze dvou konstituentů a zároveň z rozhraní mezi nimi, právě toto rozhraní působí kompozitně. [11]



Obr. 6 Možnost synergického chování kompozitu[1]

4. Recyklace opotřebených uhlíkových kompozitů

Důvodů pro recyklaci uhlíkových vláken je hned několik. Vycházíme z předpokladu, že uhlíková vlákna jsou i dnes poměrně drahou komoditou, z tohoto důvodu se podniky snaží využít již jednou vyrobená vlákna, která již splnila svojí původní funkci a nacházejí pro ně nové užití v jiných aplikacích. Další aspekt je ekologický, pouhé skládkování jednou vyrobených materiálů je velkou zátěží pro životní prostředí, přičemž dochází k mrhání materiálu a energiemi, které byly pro vlastní výrobu využity.



Obr. 7 Uhlíková vlákna z tepelně rozloženého kompozitu (foto autora)

4.1 Recyklace termosetových kompozitů

Recyklace termosetových kompozitů se obecně rozděluje do čtyř hlavních skupin.

- 1) Mechanická recyklace
- 2) Chemická recyklace
- 3) Tepelná pyrolýza

4.1.1 Mechanická recyklace

Jedná se o technologii, při které se původní opotřeбенý výrobek namele na jemný prášek. Kompozit prochází několika stupni mletí tak, aby se dosáhlo prášku o velikosti zrna v rozsahu 100 – 600 μm . Výsledkem tohoto procesu jsou prášková plniva. [17]

4.1.2 Chemická recyklace

Chemická recyklace využívá rozkladu matrice ve vhodném rozpouštědle (subkritická voda, subkritický propanol, kyselina sírová, kyselina dusičná) na nižší molekulární útvary. Polymerní matrice se mění na oligomery, popřípadě monomery. Výhodou této metody je nenáročnost v oblasti čistoty vstupního materiálu, je však vcelku nákladná a technologicky náročná, proto může probíhat pouze v provozech s dostatečným vybavením. Získaná vlákna mají původní délku a po další povrchové úpravě se dají znovu využít. [17]

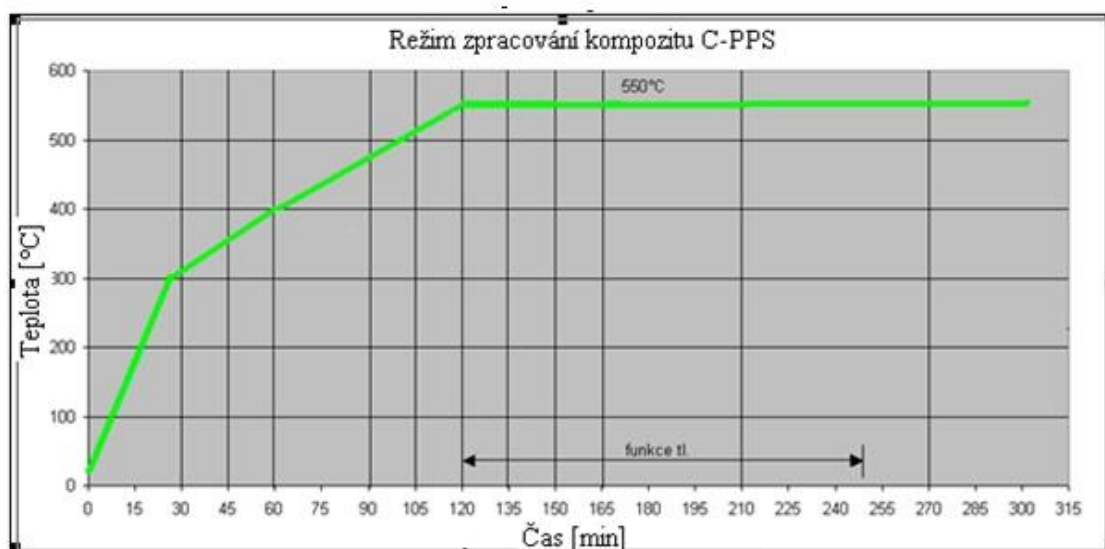
4.1.3 Tepelná pyrolýza

Tato metoda je založena na teplotním rozkladu matrice. Provádí se v pyrolýzním reaktoru, kde se za sníženého tlaku v normálním (při sníženém obsahu kyslíku) nebo inertním prostředí (N_2 , Ar) kompozit zahřívá, čímž se matrice převádí do plynného skupenství a je následně odsávána, filtrována a kondenzována. Samotná uhlíková výztuž zůstává v reaktoru. Touto metodou lze recyklovat základní řady kompozitů, např. uhlík – epoxid, uhlík – bismaleimid, sklo – fenol, sklo – polyester. Základní rozklad desek z kompozitu uhlík – epoxid lze rozdělit do čtyř základních kroků. Teploty a časy vyhřátí se mohou měnit podle daného kompozitu. [15]

- 1) Počáteční prudké zahřátí na teplotu 250°C, které probíhá po dobu 45 minut.
- 2) Pozvolné zvyšování teploty na 550 - 650°C, probíhá v intervalu 120 minut.
- 3) Vyhřívání materiálu za teploty 550 - 650°C, po dobu 15 minut.
- 4) Urychlený pokles teploty na hodnoty standardního prostředí.

Je zřejmé, že pro různé druhy uhlíkového kompozitu (dle zvoleného konstrukčního materiálu), musíme dodržovat vhodné technologické postupy rozkladu tak, aby byla co nejlépe odstraněna složka matrice a zároveň aby nedošlo ke zbytečnému poškození uhlíkových vláken. Kontrola odstranění matrice a poškození uhlíkových vláken může být prováděna na metalografickém mikroskopu. [15].

Na Obr.8 je vyjádřen průběh teploty v reaktoru při recyklaci uhlíkových vláken s PPS matricí.



Obr.8 Průběh teploty při recyklaci C-vláken s PPS matricí

5 Využití recyklovaných uhlíkových vláken

Recyklovaná uhlíková vlákna se dnes ve výrobě kompozitních materiálů s výztuží z dlouhých vláken příliš nevyužívají, na obzoru se však rýsují nové aplikace, kde budou tyto recykláty plně využity. Hlavní proud výzkumu se ubírá směrem k jejich užití ve stavebnictví a to v podobě plniva do betonů a geopolymérů. Další směry se zabývají jejich využitím jako součástí termoplastických kompozitů. Elektrotechnické obory zkoumají jejich použití jako přísad do vodivých past.

5.1 Využití recyklovaných uhlíkových vláken jako součástí stavebních hmot

Využití uhlíkových materiálů ve stavebnictví má veliký potenciál, náhrada a doplnění klasických stavebních elementů uhlíkovými vlákny přinese díky svým dobrým vlastnostem, například tuhostí, pevností, nízkou měrnou hmotností (hustotou), odolností proti korozi, vibracím, únavě a nízkou tepelnou vodivostí, prodloužení životnosti stavby a nižší náklady na údržbu. Recyklovaná uhlíková vlákna se do betonu přidávají ve zkrácené délce (do 0,5 mm), pokusy s vlákny delšími (cca 50 mm) nedopadly dobře, neboť se vlákna shlukovala a nebyla ve směsi dokonale promíchána. Přídavkem krátkých anizotropně promíchaných vláken získává beton dobré pevnostní parametry, tepelnou odolnost, korozivní odolnost, nízkou tepelnou vodivost a dobrou elektrickou vodivost, té se dá využít při diagnostice poškození materiálu a sledování prudké změny teploty.[14]

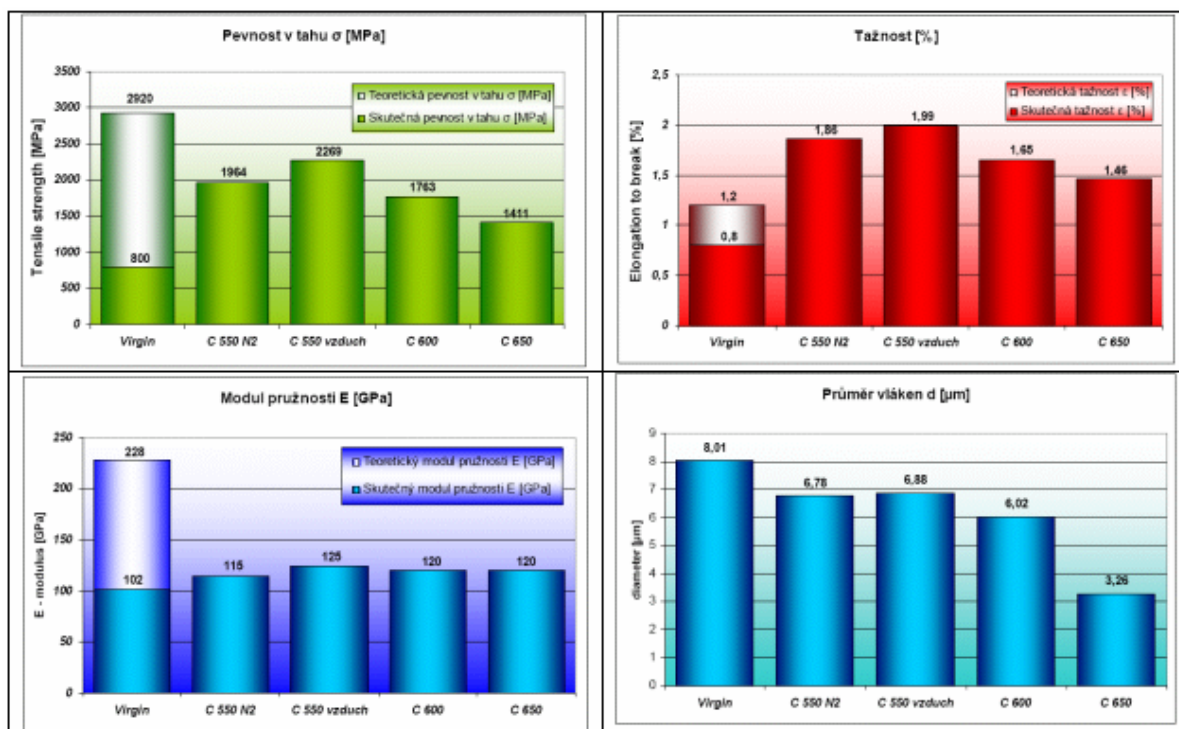
5.2 Využití recyklovaných uhlíkových vláken jako součástí termoplastů

Zkouškami prochází aplikace krátkých (0.2 – 0.5mm) recyklovaných uhlíkových vláken do termoplastů. Mezi zkoušené materiály se řadí polypropylen, polyamid 6, PVC. Bylo zjištěno, že i recyklovaná vlákna, která pozbyla pyrolytickým procesem jakékoliv povrchové úpravy, se dají bez větších problémů zakomponovat do polypropylenu a polyamidu. Celková adheze závisí jednak na přesném typu použitého vlákna i na typu konkrétních termoplastů.[14]

6 Vlastnosti recyklovaných uhlíkových vláken

Maximální čistota recyklovaných vláken, které lze dnes dosáhnout, se pohybuje okolo 98%, takže podíl nečistot je zcela minimální. V příložené tabulce jsou porovnány vlastnosti nového uhlíkového vlákna (Virgin) s vlákny testovanými při teplotách 550, 600 a 650°C. Z tabulky je patrné, že vlákna recyklovaná za teploty 550°C výrazněji ztratila na pevnosti v tahu, modul pružnosti u všech recyklátů je snížen na polovinu,

naopak výrazně vzrostla tažnost vláken. Dále je patrné, že vyšší teplota recyklace má vliv na úbytek uhlíkového materiálu. [13]



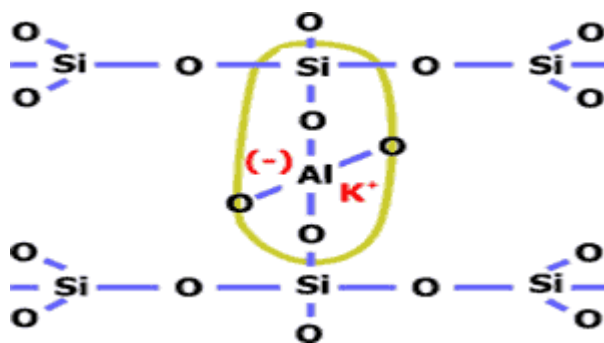
Obr.9 Porovnání fyzikálně-mechanických vlastností uhlíkových vláken Virgin s recyklovanými vlákny za různých teplot [13]

7. Geopolymery

Pojem geopolymery označuje anorganický polymer křemičitanu hliníku vyráběný syntézou materiálů geologického původu (např. křemičitých a hlinitých) v alkalickém prostředí, za normálního tlaku a teploty, lze však využít i vedlejších produktů výroby, například popílku. Můžeme je tedy definovat jako alkalické aluminosilikáty vzniklé alkalickou reakcí metakaolinu s aktivátory, mezi které se řadí hydroxid sodný, hydroxid draselný a vodní sklo. Jde tedy o amorfni hlinitokřemičitý materiál obsahující tetraedrální hlinité a křemičité jednotky kondenzují při normální teplotě, přičemž vznikají rovnovážné struktury obsahující jednomocný iont alkalického kovu. Takový materiál je potom odolný proti rozpuštění ve vodě, je nehořlavý, přičemž je rezistentní teplotám až 1000°C. Vlastní termín 'Geopolymer' pochází od profesora Davidovitse, který takto nazval alkalicky aktivovaný materiál z metakaolinu.[18]

7.1 Složení geopolimerů

Struktura geopolimerů je porézní a nahodilé prostorové uspořádaná. V pórech a gelu obsahuje vodu, která je nosičem alkalického aktivátoru. Chemický vzorec geopolimerů lze obecně vyjádřit jako: $\text{Me}[-(\text{SiO}_2)_z-\text{AlO}_2]_n * w\text{H}_2\text{O}$ (Me= alkalický kationt, n = stupeň polymerace, z =počet tetraedrických jednotek). Silikátové a aluminátové tetraedry jsou v trojrozměrné, amorfní mikrostruktuře geopolimeru vzájemně nepravidelně vázány polykondenzací přes kyslíkový můstek. Dle Loewensteinova pravidla neexistuje spojení dvou tetraedrů se stejným jádrem, mohou být spojeny pouze přes tetraedr s jiným jádrem. Z toho vyplývá, že poměr tetraedrů se silikátovým a aluminátovým jádrem musí být 1:1., jak ukazuje obr. [22]



Obr. 10 Poměr tetraedrů se silikátovým a aluminátovým jádrem [19]

7.2 Vlastnosti geopolimerů

Geopolymery se řadí mezi materiály s amorfní strukturou, pokud však dojde k jejich prudkému zahřátí, jejich struktura se změní na mikrokrystalickou. Mezi jejich důležité vlastnosti se řadí: nerozpustnost ve vodě, nehořlavost a rezistence k teplotám dosahujícím 1000°C, přičemž nevytváří zplodiny. Jejich tepelná vodivost závisí na druhu plniva, samotný geopolimer tepelně vodivý příliš není. Geopolymery dokáží pojít velké množství plniva, horní hranice dosahuje hodnoty dosahující až 90% podílu plniva ve směsi. Poměr plniva a pojiva je však řízen podle požadovaných vlastností výsledného materiálu, ať jde o jeho mechanické vlastnosti, porozitu, chemickou a tepelnou odolnost. Pevnost v tlaku se dle zvoleného poměru pojiva a plniva a dle zvoleného materiálu plniva pohybuje v rozsahu od 10 – 60MPa. Geopolymery jsou také dostatečně odolné proti kyselinám a alkáliím. [18]

7.3 Materiály užívané pro přípravu geopolymérů

Pro přípravu geopolymérů alkalickou aktivací jsou vhodné materiály s křemičitým, nebo hlinitokřemičitým základem, vyznačujícím se vhodnými hygroskopickými vlastnostmi. Jedná se o materiály jak přírodní, tak syntetické. Jsou to například kaolinické hlíny, popílky, struska, atd.

7.3.1 Pucolán - metakaolin

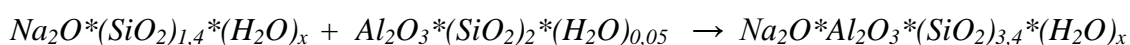
Jedná se o velice reaktivní a nestabilní hlinitokřemičitý materiál, získaný termickým zpracováním kaolinu a kaolinických jílů, teploty při zpracování se pohybují v rozsahu 650 – 900°C. Od kalcinační teploty se odvíjí reaktivita metakaolinu. Čím je teplota vyšší tím je metakaolin reaktivnější. Důvodem je fakt, že se zvyšující se kalcinační teplotou dochází ke snížení obsahu zbytkového kaolinitu. Pojivé vlastnosti metakaolinu vznikají za vlhka reakcí hlinitokřemičitého materiálu s Ca(OH)_2 . Metakaolin se využívá pro výrobu geopolymérů, jako součást betonů a vápenných malt, u kterých výrazně zvyšuje jejich mechanické a chemické vlastnosti i odolnost vůči mrazu. [18]

7.3.2 Popílek

Popílek vzniká jako zbytkový produkt uhelných elektráren. Složení popílku je heterogenní a je určeno chemickým složením spalovaného uhlí a průběhem spalovacího procesu, obsah jednotlivých složek je tedy proměnlivý. Proměnlivé jsou i chemické, fyzikální a minerální hodnoty jednotlivých komponent. Popílek obsahuje hlavně oxid křemičitý (až 70%) a oxid hlinitý. Popílek se může využít při přípravě betonů, malt a geopolymérů s nekonvenčními vlastnostmi, kde může tvořit aktivní i pasivní součást, což znamená, že se může, ale i nemusí podílet na procesu tvrdnutí betonu, a tím ovlivňovat pevnost výsledného produktu. [23]

7.4 Alkalická aktivace

Alkalická aktivace může probíhat jenom v silně zásaditém prostředí, kdy je pH prostředí vyšší než 12. Při alkalické aktivaci dochází k rozpadu trojrozměrné struktury hlinitokřemičitanu, vznikají křemičitanové a hlinitanové anionty. Polymerace nastává za exotermní reakce oxidů křemíku a hliníku s alkálií (Na^+ , K^+). Vzniká vazba Si–O–Al. Finální pevný charakter geopolymery je tvořen soustavou sol-gel. Alkalická aktivace vodním sklem má za výsledek geopolymer obsahující jednotky sialát- siloxo $[-\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-\text{O}-\text{Si}-\text{O}-]$, nebo sialát-disiloxo $[-\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-\text{O}-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-\text{O}-]$ podle reakce:



Prekruzorem těchto reakcí je voda, která mizí během vlastního reakčního procesu. [24]

7.4.1 Alkalické aktivátory

Jako aktivátory můžeme používat hydroxidy, uhličitany a vodní skla, většinou se jedná o roztoky sodíku draslíku a lithia. Dále však můžeme použít: síran sodný a chlorid sodný, pro přípravu alkalicky aktivovaných cementů je možné použít síran a chlorid vápenatý, popřípadě vápno. Alkalický aktivátor je nedílnou součástí geopolymery, bez kterého by vlastní geopolymer nemohl vzniknout. Jeho vhodné užití zásadně ovlivňuje výsledné vlastnosti produktu, například pevnost. Množství a druh aktivátoru se mění dle vlastností aktivovaného materiálu. Například v roztoku draselného aktivátoru se pohybuje množství K_2O v rozmezí 3-10%, u Na_2O je rozmezí nižší, jedná se o 2-8%. Dobrých pevnostních výsledků při aktivaci bylo dosaženo s vodním sklem a kombinací vodního skla s hydroxidem sodným. Nejlepší pevnostní vlastnosti ale prokazoval koloidní roztok vodního skla se silikátovým modulem v rozmezí 1 – 2, kdy mechanická pevnost roste v závislosti na snižování silikátového modulu. V tomto případě dochází ke zvýšení obsahu alkálií v systému vodního skla. Dalším faktorem výrazně ovlivňujícím pevnost geopolymery je koncentrace aktivátoru, čím je koncentrace vyšší, tím větší je i pevnost výsledného geopolymery. [20]

8 Experimentální část

Experimentální část popisuje složení vzorků, jejich přípravu, užívané přístroje a vlastní průběh zkoušek.

8.1 Příprava zkušebních vzorků

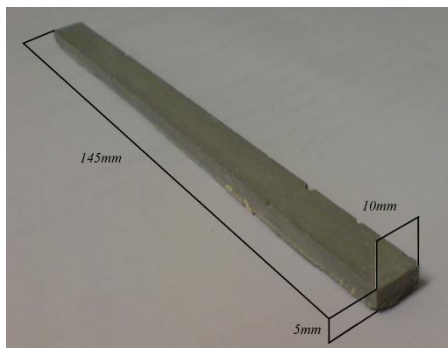
Jako formy pro přípravu zkušebních vzorků byly použity bezešvé instalátéřské PPR trubky s vnitřním průměrem 28,2mm. Trubky byly nařezány na úseky dlouhé 100 mm a byly silikonovým lepidlem připevněny na hladkou podložku.



Obr.11 Formy pro přípravu zkušebních vzorků.(foto autora)

Jako geopolymer byl použit BAUCIS z Lupkových závodů Nové Strašecí. Jako plnivo byla použita recyklovaná C-vlákna z VZLÚ Praha, mletá na délku 0,2 mm. Jednotlivé směsi geopolymery Baucis a mletých uhlíkových vláken byly promíchány pomocí míchacího strojku, nality do forem a pomocí střešacího zařízení byly řádně zklepány a odvzdušněny. Vrchní část vzorků byla srovnána a překryta igelitovou fólií. Hotové vzorky o různých koncentračních řadách zasychaly 14 dnů při pokojové teplotě a poté na nich byly provedeny jednotlivé zkoušky.

Obdobným způsobem byly připraveny vzorky pro měření elektrického odporu. Vzorky geopolymérů s přidavkem mletých uhlíkových vláken měly tvar dlouhého tenkého kvádru o rozměrech: šířka 10mm, délka 145mm a výška 5mm.



Obr.12 Rozměry geopolymerního vzorku (foto autora)

Pro měření elektrického odporu bylo celkově vyhotoveno 5 vzorků, u každého vzorku byla koncentrace mletých uhlíkových vláken jiná a to v řadě: 0, 0.2, 0.5, 1 a 2%. Vzorky zasychaly 14 dnů při pokojové teplotě.

8.1.1 Příprava jednotlivých směsí

Celkem bylo připraveno šest směsí, do kterých byla přidána různá koncentrace mletých uhlíkových vláken (0,2%, 0,5%, 1%, 2%, 5%) jedna řada byla pro porovnání vlastností nechána bez přidání mletých uhlíkových vláken. Jako pojivo byl použit aktivovaný Baucis v poměru 5:4 (5 dílů aktivované pevné složky, 4 díly aktivátoru). Od každé koncentrační řady bylo vyhotoveno na každou zkoušku pět vzorků.

8.1.1.1 Použitý geopolymer – Baucis

Tento geopolymer je produkt společnosti České lupkové závody a.s. Nové Strašecí, prodává se pod obchodním označením Baucis. Je to dvousložkový geopolymerní materiál obsahující metakaolin s pucolánovou příměsí, který se aktivuje alkalickou tekutinou na bázi vodního skla.

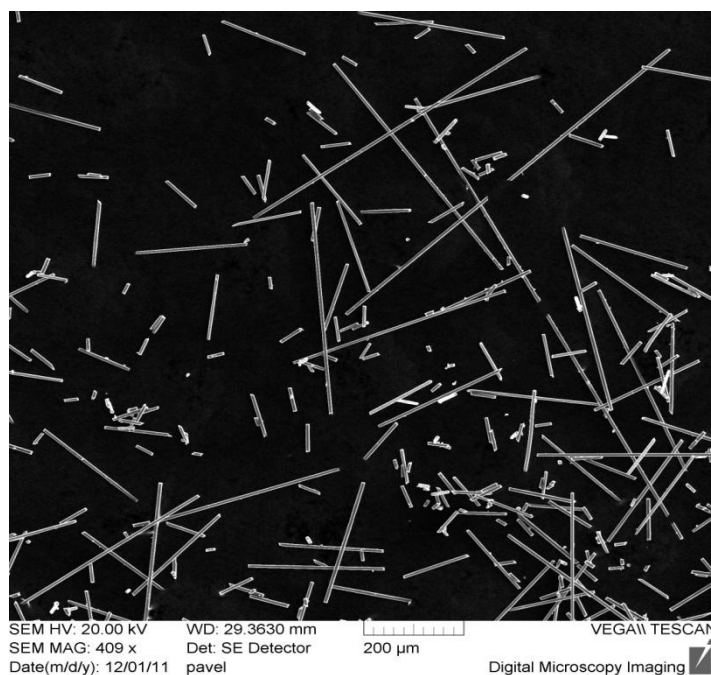
8.1.1.2 Mletá uhlíková vlákna

Recyklovaná uhlíková vlákna byla dodána Výzkumným a zkušebním leteckým ústavem a.s. byla namleta na krátká vlákna, u kterých byly z 200 měření zjištěny tyto parametry:

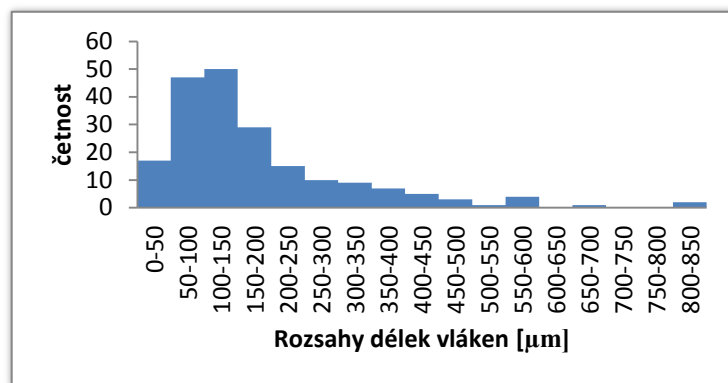
Parametr	Délka [μm]	Tloušťka [μm]
Průměr	176,91	7,47
Rozptyl	17897,08	3,13
Směrodatná odchylka	133,78	1,77
Variační koeficient [%]	103,9	33,33
Interval spolehlivosti L_D	158,37	7,22
Interval spolehlivosti L_H	195,45	7,72
Počet měření	200	200

Tab.1 Parametry mletých uhlíkových vláken

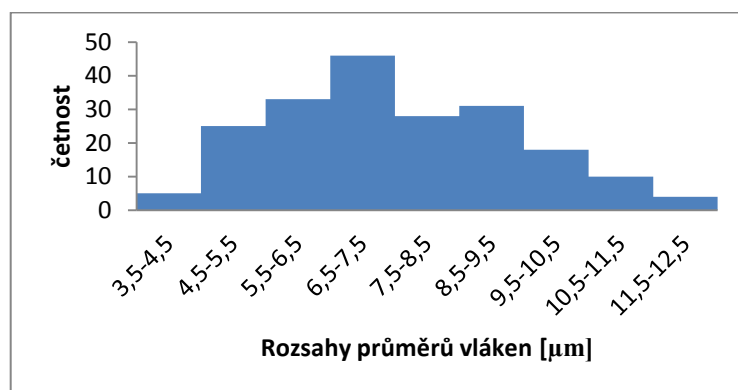
Z naměřených dat byly zkonstruovány histogramy četností (graf 1 a 2)



Obr.13 Mletá uhlíková vlákna (foto autora)



Graf 1. Histogram délek mletých uhlíkových vláken



Graf 2. Histogram průměrů mletých uhlíkových vláken

Tato vlákna byla ve zvolených poměrech přidávána do geopolymerních směsí

8.2 Přístroje použité při výrobě vzorků, testovací přístroje

K přípravě vzorků byly použity následující přístroje: laboratorní váhy, mlýnek na vlákna, improvizovaná digestoř, míchací strojek, střešadlo, trhací stroj pro zjištění pevnosti v tlaku a ohybu, přístroj pro měření elektrického odporu.

8.2.1 Mlýnek na vlákna

Uhlíková vlákna byla mleta ve svazku vážícím 5g, při 8000 ot/min po dobu 10 minut. Tímto postupem bylo dosaženo stejného stupně namletí u všech mlecích cyklů – vlákna ve všech vzorcích mají tudíž obdobné parametry. Po mletí byla vlákna prosívána přes sítko a vlákna, která na sítku zbyla byla znovu přemleta.



Obr.14 Mlýnek na vlákna (foto autora)

8.2.2 Stojanová míchačka Heidolph RZR 2020

Míchání směsi Baucisu a mletých uhlíkových vláken bylo prováděno na míchačce Heidolph RZR 2020. Směs byla míchána po dobu 10 minut při 1500 ot/min. Příprava směsi byla provedena dle normy ČSN 72 2117.



Obr.15 Stojanová míchačka Heidolph RZR 2020(foto autora)

8.2.3 Vibrační vysokofrekvenční stolek VSB - 15

Tento vysokofrekvenční vibrační stolek je určen ke zhutňování betonových a jiných směsí pro laboratorní účely. Materiál na tomto stolku byl třikrát zhutněn – vždy po naplnění 1/3 formy. Zklepávání probíhalo při každém cyklu po dobu 40s při 11500 ot/min.



Obr. 16 Vibrační stolek VSB 15(foto autora)

8.3 Mechanické zkoušky

Materiály jsou při užívání vystaveny mnohým druhům mechanického namáhání. Abychom zjistili jejich chování při namáhání, je nutno provést mechanické zkoušky. Mezi hlavní druhy zkoušek se řadí: Pevnost v tahu, tlaku, ohybu, stříhu a krutu. Dále je zjišťována tvrdost, rázová a vrubová houževnatost a rezistence proti cyklickému namáhání.

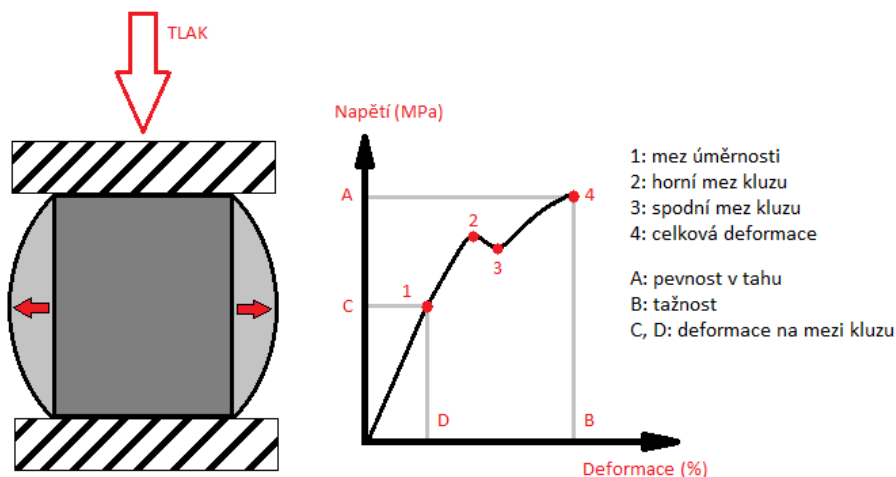
Na experimentálním materiálu byly provedeny tyto zkoušky:

- pevnost v tlaku
- pevnost v ohybu

Tyto zkoušky jsou optimální pro zjištění užitných vlastností betonů, keramiky a geopolymérů. [25]

8.3.1 Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku vychází se zjištění hodnot pevnosti materiálu při jednoosém namáhání. Měření končí celkovou destrukcí zkoumaného vzorku, v průběhu zkoušky je vzorek stlačen a dochází k jeho rozšíření.



Obr. 17 Rozšíření testovaného vzorku při zatížení, Deformační křivka

Při zkoušce tlakem (tahem též) má začátek křivky lineární průběh, při které se materiál chová dle Hookeova zákona $\sigma = E\varepsilon$, kde E je Youngův modul pružnosti a ε je deformace. Tato lineární část končí mezí kluzu, při jejím překročení dochází k nevratným plastickým deformacím na materiálu. Napětí a deformaci počítáme dle vzorce:[25]

$$\text{Napětí: } \sigma = \frac{F \text{ (N)}}{A \text{ (m}^2\text{)}}$$

kde F je síla, kterou je na vzorek tlačeno a A je plocha vzorku

Deformace: $\varepsilon = \frac{l-l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0}$ [1] kde l je délka stlačeného vzorku a l_0 je délka vzorku před měřením

8.3.1.1 Označení mechanických vlastností při zkoušce tlakem

- | | |
|---------------------------|----------------|
| 1. Mez pevnosti v tlaku | R_{mt} [MPa] |
| 2. Mez kluzu v tlaku | R_{et} [MPa] |
| 3. Mezní poměrné stlačení | A_t [%] |

4. Mezní poměrné rozšíření Z_t [%]

Napěťové charakteristiky: R_{mt} , R_{et}

Deformační charakteristiky: A_t , Z_t

Vzorce pro výpočet mechanických vlastností:

1. Mez pevnosti v tlaku: $R_{mt} = \frac{F_{mt}}{S_0}$ [MPa]

2. Mez kluzu v tlaku: $R_{et} = \frac{F_{et}}{S_0}$ [MPa]

3. Mezní poměrné stlačení: $A_t = \frac{\Delta h}{h_0} * 100 = \frac{h_0 - h_u}{h_0} * 100$ [%]

4. Mezní poměrné rozšíření: $Z_t = \frac{\Delta S}{S_0} * 100 = \frac{S_u - S_0}{S_0} * 100$ [%]

[25]

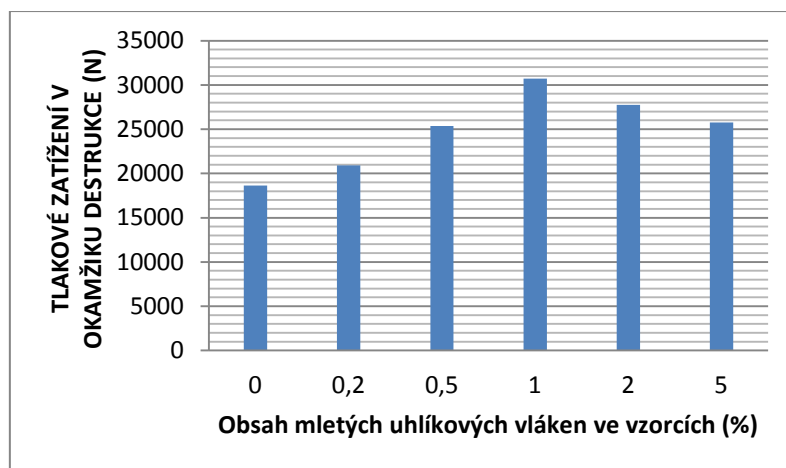
8.3.1.2 Vlastní zkouška tlakem

Zkouška tlakem byla provedena u vzorků s obsahem mletých uhlíkových vláken

0, 0.2, 0.5, 1, 2, 5 % . Od každé koncentrační řady byly provedeny tři zkoušky. Před vlastní zkouškou byly vzorky nařezány - měly tedy válcovitý tvar o průměru 28,2 mm a délce 20 mm. Test probíhal na trhacím stroji FP 100 - LabTestII o rozsahu 0 - 100 kN. Výsledky zkoušek byly zpracovány na napojeném počítači. Bylo dosaženo těchto výsledků

Tab.2 Pevnost v tlaku

:parametr	Obsah mletých uhlíkových částic					
	0%	0,2%	0,5%	1%	2%	5%
Průměrná hodnota při destrukci [N]	18628,5	20931,36	25374,1	30699	27764,4	25755,5
rozptyl	52621136	253823,2	68846490	4118866	16486873	2573101,1
Sm. Odchyl.	7254,043	503,8087	8297,378	2029,499	4060,403	1604,1
IS Ld	10419,93	20361,3	15984,9	28402,5	23192,3	23940,3
IS Lh	26837,1	21501,5	34763,3	32995,5	32336,5	27570,7



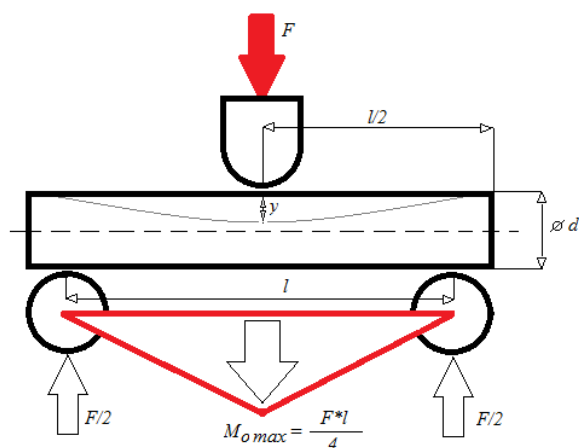
Graf 3. Vliv obsahu mletých uhlíkových vláken na pevnost v tlaku

Statistickou analýzou bylo dokázáno, že průměry pevností (rezistivit) v tlaku se od sebe statisticky liší a proto je nutno brát tyto průměry jako věrohodné. Z výsledného grafu (*Graf 1.*) je patrné, že největší rezistivitu proti tlaku má materiál s obsahem uhlíkových partikulí 1%. Závislost rezistivity v tlaku na koncentraci uhlíkových partikulí v kompozitním materiálu byla podrobena regresní analýze. Regresní analýza byla provedena v prostředí statistického software QC Expert, kde bylo prokázáno, že závislost nejlépe popisuje polynom druhého stupně.

Po vypočtení lokálního maxima křivky dané funkcí bylo stanoveno, že **optimální obsah namletých uhlíkových vláken je 2,93 %**

8.3.2 Zkouška ohybem

Zkouška ohybem se používá hlavně u křehkých a málo tvárných materiálů, proto je vhodná i pro zkoušení geopolymerních vzorků. Při zkoušce ohybem sledujeme největší prohnutí vzorku v okamžiku deformace, zjistíme tím houževnatost materiálu. Vzorek je při zkoušce ohybem položen na dvou podporách, přičemž zátěž působí kolmo na vzorek přesně v jeho středové části. Tímto je rozložení napětí nerovnoměrné – maximální hodnoty tahu a tlaku jsou na povrchu a klesají směrem k neutrální ose. Stejně jako zkoušky na tlak a tah se zkouška ohybem provádí na trhacím stroji. Cílem této zkoušky je zjistit pevnost vzorku v ohybu δ_{po} . [25]



Obr.18 Schématické znázornění tříbodové zkoušky ohybem[25]

Pevnost v ohybu: $\delta_{po} = \frac{M_{o \max}}{W_0}$ [MPa]

Ohybový moment: $M_{o \max} = \frac{F_{\max} * l}{4}$ [N*m]

Kde l je vzdálenost podpor a F_{\max} je maximální síla zatížení.

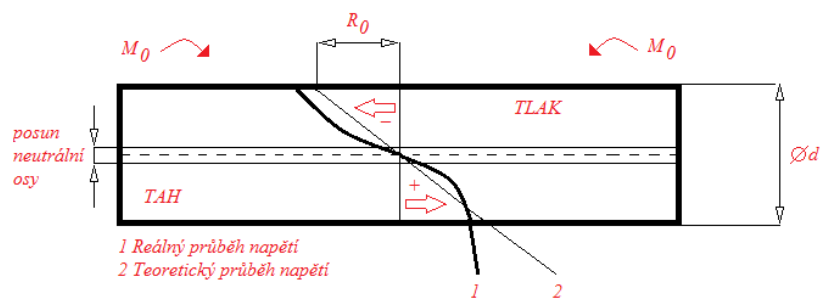
Modul průřezu W_0 se dosazuje dle průřezu zkoušeného vzorku:

Pro kruhový průřez: $W_0 = \frac{\pi * d^3}{32}$ [m³]

Dle zákona úměrnosti je možno dále vypočítat modul pružnosti v tahu E .

$$E = \frac{F * l^3}{48 * J * y}$$
 [MPa]

V tomto případě J znázorňuje modul setrvačnosti namáhaného vzorku v [m⁴] a y se rovná průhybu v [m]. [25]



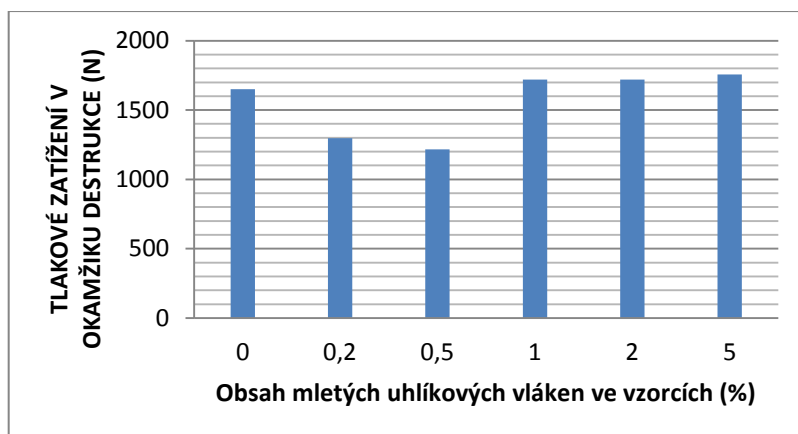
Obr.19 Napětí nad mezí úměrnosti ve vzorku s kruhovým průřezem u materiálu s různými vlastnostmi v tahu a tlaku. [25]

8.3.2.1 Vlastní zkouška ohybem

Zkouška ohybem byla provedena u vzorků s obsahem mletých uhlíkových vláken 0, 0.2, 0.5, 1, 2, 5 %. Od každé koncentrační řady byly provedeny dvě zkoušky. Vzorky měly válcový tvar, jejich průměr byl 28,2 mm a délka byla 100mm. Zkouška byla prováděna na trhačím stroji FP 100 – LabTestII. Výsledky zkoušek byly zpracovány na napojeném počítači. Bylo dosaženo těchto výsledků:

Tab.3. Pevnost v ohybu

Parametr	Obsah mletých uhlíkových částic					
	0%	0,2%	0,5%	1%	2%	5%
Průměrná hodnota při destrukci [N]	1650,3	1296,1	1216,646	1719,4	1718,6	1756,4
rozptyl	110586,3	91502,1	121578,2	9814	7831,3	-
Sm. Odchyl	332,5	302,5	348,7	99,1	88,5	-
IS Ld	1189,5	876,9	733,4	1582,1	1596	-
IS Lh	2111,1	1715,4	1699,9	1856,7	1841,2	-



Graf 4. Vliv obsahu mletých uhlíkových vláken na pevnost v ohybu

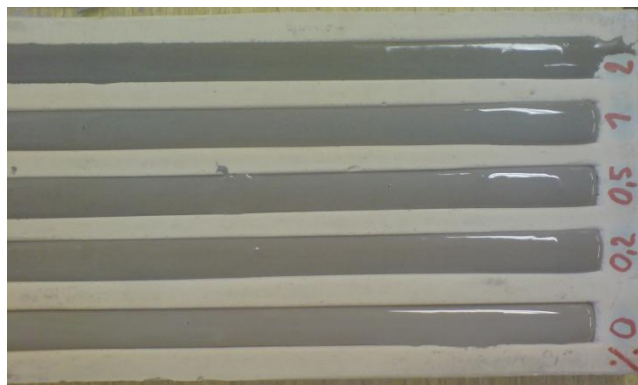
Nejlepších výsledků bylo dosaženo u vzorků s obsahem mletých uhlíkových vláken nad 1%, rozdíly však nejsou markantní a zcela průkazné. Exaktnějších výsledků by bylo dosaženo při testování početnějších skupin jednotlivých koncentračních tříd.

Závislost pevnosti v ohybu na koncentraci mletých uhlíkových vláken v kompozitním materiálu byla podrobena regresní analýze. Regresní analýza byla provedena v prostředí statistického software QC Expert, kde bylo prokázáno, že závislost nejlépe popisuje polynom druhého stupně.

Po vypočtení lokálního maxima křivky dané funkcí bylo stanoveno, že **optimální obsah namletých uhlíkových vláken je 3,28 %**

8.4 Měření elektrického odporu geopolymery

Elektrický odpor je fyzikální veličina, která udává schopnost vodiče vést elektrický proud, její převrácená hodnota je elektrická vodivost. Hodnota elektrického odporu závisí na materiálu, tvaru a teplotě vzorku. Velikost el. odporu ovlivňuje délka vodiče (přímou úměrou), obsah průřezu vodiče (nepřímou úměrou), materiální složení vodiče, které ovlivňuje měrný elektrický odpor a na teplotě vodiče. Toto měření sleduje, jak se elektrický odpor mění u geopolymerních vzorků se zvyšující se koncentrací mletých uhlíkových vláken.



Obr. 20 Vzorky pro měření elektrického odporu.

Elektrický odpor počítáme dle: Ohmova zákona: $R = \frac{U[V]}{I[A]} [\Omega]$

Vlastností vodiče: $R = \frac{\rho * l}{S} [\Omega]$

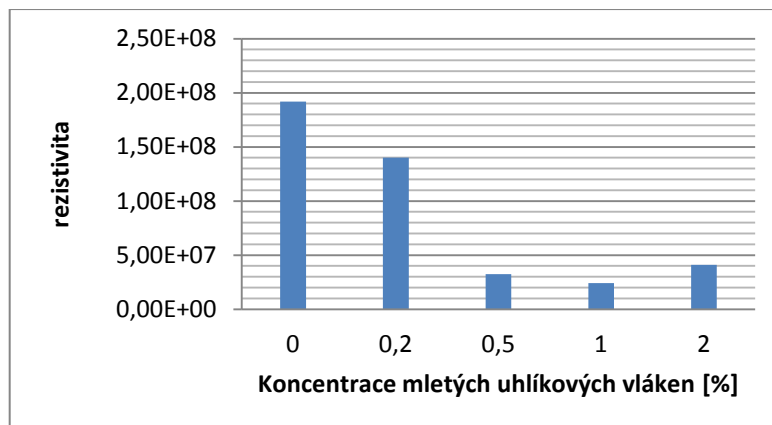
Kde: ρ je měrný el. odpor, l je délka vodiče a S je obsah průřezu vodiče.

Objemovou rezistivitu počítáme dle vzorce: $\rho_v = R_v * \frac{Se}{h} [\Omega \text{cm}]$

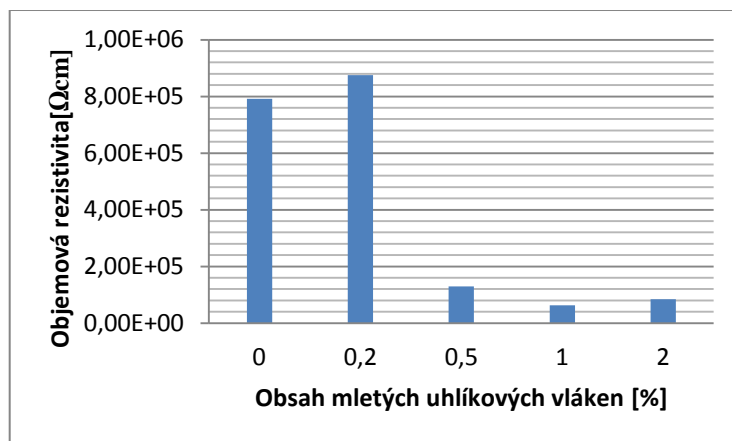
Kde: R_v je rezistence $[\Omega]$, h je vzdálenost elektrod (délka měřeného vzorku), Se je plocha elektrod $[\text{cm}^2]$.

8.4.1 Vlastní měření elektrického odporu geopolymérů s přidaným mletým uhlíkovým vláknem

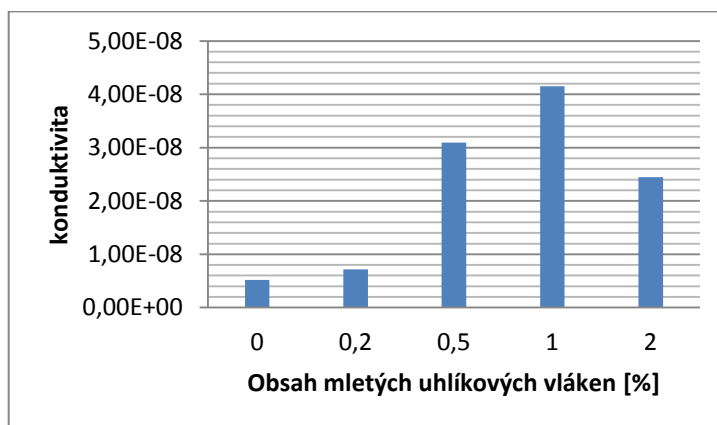
Vlastní měření probíhalo při teplotě 22,8°C, a vlhkosti 42,2% na měřicím přístroji High Resistance Meter 4339B Hawlett Packard. Pro měření bylo zvoleno napětí 100 V. Měření probíhalo s krokem 14,5mm, na každém vzorku bylo provedeno 10 měření. U celé koncentrační řady byla zjištěna jak povrchová, tak objemová rezistivita.



Graf 5. Vliv přidavku mletých uhlíkových vláken na povrchovou rezistivitu vzorku.



Graf 6. Vliv přidavku mletých uhlíkových vláken na objemovou rezistivitu vzorku.



Graf 7. Vliv přidavku mletých uhlíkových vláken na konduktivitu vzorku

Obsah vláken	Množství namletých uhlíkových vláken v geopolymu				
	0%	0,2%	0,5%	1%	2%
rezistivita	5,2083 e-9	7,1428 e-9	3,0959 e-8	4,1493 e-8	2,4449 e-8

Tab.4Průměrné konduktivity

Nejmenší povrchovou i objemovou rezistivitu dle naměřených hodnot vykazují vzorky s 1% přidaných uhlíkových vláken. Se snižujícím se obsahem C – částic odpor vzrůstá.

9. Výsledky experimentu

Tato část práce analyzuje a hodnotí jednotlivé zkoušky. Porovnává závislost pevnosti geopolymu na množství přidaných uhlíkových vláken. Rovněž hodnotí velikost elektrického odporu geopolymerních vzorků s různým procentem obsahu mletých uhlíkových vláken.

Závislost pevnosti v tlaku a v ohybu kompozitního materiálu na obsahu namletých uhlíkových vláken byla stanovena lineární regresí (metodou nejmenších čtverců) v prostředí statistického software QCExpert.

Byly analyzovány tyto regresní modely:

- přímka
- polynom 2. stupně
- polynom 3. stupně

Jako optimální byl nalezen model polynomu 2. stupně.

Na 1. derivaci regresní funkce byl nalezen v maximu křivky optimální obsah namletých uhlíkových vláken ($dy/dx = 0$)

9.1.1 Pevnost v tlaku - lineární regrese (polynom 2.stupně)

Název úlohy: Závislost pevnosti kompozitu na obsahu plniva – tlak 2

Hladina významnosti :	0.05
Kvantil $t(1-\alpha/2, n-m)$:	3.18
Kvantil $F(1-\alpha, m, n-m)$:	9.55
Absolutní člen :	Ano
Počet platných řádků :	6
Počet parametrů :	3
Metoda :	Nejmenší čtverce

Základní analýza

Charakteristiky proměnných :

Proměnná	Průměr	Směr.Odch.	Kor.vs.Y	Významnost
A	1.45	1.88	0.46	0.35
A ²	5.05	9.89	0.26	0.62

Odhady parametrů

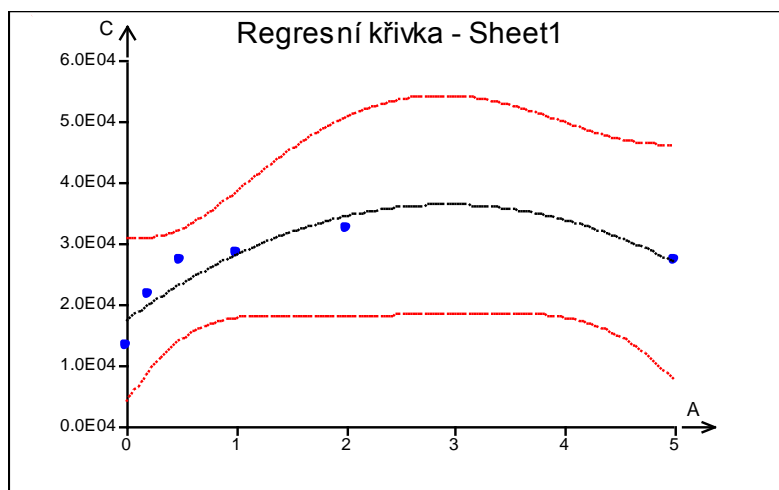
Proměnná	Odhad	Směr.Odch	Závěr	Pravděp.	Spodní mez	Horní mez
Abs	17378.19	2502.9	Významný	0.006	9412.86	25343.52
A	12899.72	3552.96	Významný	0.036	1592.62	24206.83
A ²	-2200.42	675.38	Významný	0.047	-4349.78	-51.06

Regresní rovnice: $y = -2200,42 x^2 + 12899,72 x + 17378,19$

Tab.5 Odhady parametrů v tlaku - polynom 2. stupně.

Statistické charakteristiky regrese

Vícenásobný korelační koeficient R :	0.91
Koeficient determinace R ² :	0.83



Graf 8. Regresní křivka pevnosti v tlaku – polynom 2. stupně.

9.1.4 Tabulka výsledků – pevnost v tlaku

Transformace	Korelační koef. R	Regresní rovnice
Polynom 2. stupně	0.91	$y = -2200,42x^2 + 12899,72x + 17378,19$

Tab.6 Výsledky korelační analýzy: Pevnost v tlaku

Po vypočtení lokálního maxima křivky dané funkcí

$$y = -2200,42x^2 + 12899,72x + 17378,19$$

bylo stanoveno, že **optimální obsah namletých uhlíkových vláken je 2,93 %**

9.2.2.Pevnost v ohybu- lineární regrese (polynom 2.stupně)

Název úlohy: Závislost pevnosti v ohybu kompozitu na obsahu plniva – ohyb 2

Hladina významnosti : 0.05

Kvantil $t(1-\alpha/2, n-m)$: 4.30

Kvantil $F(1-\alpha, m, n-m)$: 19

Absolutní člen : Ano

Počet platných řádků : 5
 Počet parametrů : 3
 Metoda : Nejmenší čtverce

Základní analýza

Charakteristiky proměnných

Proměnná	Průměr	Směr.Odch.	Kor.vs.Y	Významnost
A	1.74	1.95	0.66	0.22
A ²	6.058	10.71	0.51	0.38

Odhady parametrů

Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr	Pravděp.	Spodní mez	Horní mez
Abs	1101.84	137.47	Významný	0.016	510.36	1693.32
A	545.06	172.48	Nevýznamný	0.087	-197.07	1287.18
A ²	-83.12	31.35	Nevýznamný	0.12	-218.06	51.74

Regresní rovnice: $y = -83,12 x^2 + 545,06 x + 1101,84$

Tab.7 Odhady parametrů v ohybu – polynom 2. stupně.

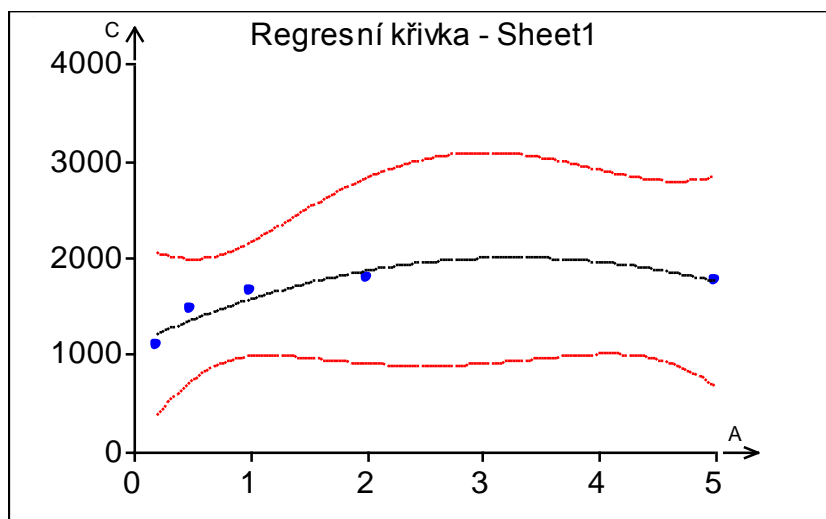
Statistické charakteristiky regrese

Vícenásobný korelační koeficient R : 0.936
 Koeficient determinace R² : 0.876

Testování regresního tripletu

Fisher-Snedecorův test významnosti modelu

Hodnota kritéria F : 7.06
 Kvantil F (1-alfa, m-1, n-m) : 19
 Pravděpodobnost : 0.124
 Závěr : Model je nevýznamný



Graf 9. Regresní křivka pevnosti v ohybu – polynom 2. stupně.

9.2.4 Tabulka výsledků – pevnost v ohybu

Transformace	Korelační koef. R	Regresní rovnice
Polynom 2. stupně	0.936	$y = -83,12x^2 + 545,06x + 1101,84$

Tab.8 Výsledky korelační analýzy: Pevnost v ohybu

Po vypočtení lokálního maxima křivky dané funkcí

$$y = -83,12x^2 + 545,06x + 1101,84$$

bylo stanoveno, že **optimální obsah namletých uhlíkových vláken je 3,28 %**

9.3 Výsledky měření elektrického odporu

Tab.9 Měření elektrické rezistivity u vzorků s 0% obsahem C - partikulí

vzorek 0%	rezistivita	objemová rezistivita [Ωcm]
0a	1,98E+08	9,74E+05
	2,19E+08	1,08E+06
	1,09E+08	5,36E+05
	2,18E+08	1,07E+06
0b	1,08E+08	3,90E+05
	8,68E+07	3,14E+05
	1,49E+08	5,39E+05
	1,37E+08	4,95E+05
	2,30E+08	8,31E+05
	4,65E+08	1,68E+06
průměr	1,92E+08	7,91E+05
sm. odch.	1,09E+08	4,21E+05

[U vzorku došlo při vyjímání z formy k jejich rozdělení na dva díly, jsou pro to označeny 0a a 0b]

Tab.10 Měření elektrické rezistivity u vzorků s 0,2% obsahem C - partikulí

vzorek 0,2%	rezistivita	objemová rezistivita [Ωcm]
0,2a	1,22E+08	8,13E+05
	1,84E+08	1,23E+06
	1,98E+08	1,32E+06
0,2b	1,06E+08	6,77E+05
	1,20E+08	7,66E+05
	1,48E+08	9,45E+05
0,2c	1,21E+08	6,98E+05
	1,81E+08	1,04E+06
	1,01E+08	5,83E+05
	1,18E+08	6,81E+05
průměr	1,40E+08	8,75E+05
sm. odch.	3,54E+07	2,50E+05

[U vzorku došlo při vyjímání z formy k jejich rozdělení na tři díly, jsou pro to označeny 0,2a, 0,2b a 0,2c]

Tab.11 Měření elektrické rezistivity u vzorků s 0,5% obsahem C - partikulí

vzorek 0,5%	rezistivita	objemová rezistivita [Ωcm]
0,5a	3,63E+07	1,60E+05
	1,30E+07	5,74E+04
	1,64E+07	7,24E+04
	1,14E+07	5,03E+04
	2,62E+07	1,16E+05
0,5b	4,79E+07	1,84E+05
	3,44E+07	1,32E+05
	4,58E+07	1,76E+05
	5,35E+07	2,06E+05
	3,76E+07	1,45E+05
průměr	3,23E+07	1,30E+05
sm. odch.	1,50E+07	5,49E+04

[U vzorku došlo při vyjímání z formy k jejich rozdělení na dva díly, jsou pro to označeny 0,5a a 0,5b]

Tab.12 Měření elektrické rezistivity u vzorků s 1% obsahem C - partikulí

vzorek 1%	rezistivita	objemová rezistivita [Ωcm]
1	1,33E+07	3,47E+04
	1,68E+07	4,38E+04
	3,46E+07	9,03E+04
	1,56E+07	4,07E+04
	1,44E+07	3,76E+04
	1,61E+07	4,20E+04
	2,06E+07	5,37E+04
	1,31E+07	3,42E+04
	4,21E+07	1,10E+05
	5,44E+07	1,42E+05
průměr	2,41E+07	6,29E+04
sm. odch.	1,45E+07	3,78E+04

Tab.13 Měření elektrické rezistivity u vzorků s 2% obsahem C - partikulí

vzorek 2%	rezistivita	objemová rezistivita [Ωcm]
	2,19E+07	4,50E+04
	1,66E+07	3,41E+04
	4,14E+07	8,51E+04
	5,31E+07	1,09E+05
	2,96E+07	6,08E+04
	3,14E+07	6,45E+04
	5,90E+07	1,21E+05
	5,15E+07	1,06E+05
	3,95E+07	8,12E+04
	6,47E+07	1,33E+05
průměr	4,09E+07	8,40E+04
sm. odch.	1,61E+07	3,30E+04

Tyto tabulky popisují výsledky měření povrchové a objemové rezistivity zkoumaných vzorků. Každý vzorek byl měřen desetkrát s krokem 1,45cm—U každé tabulky byla zároveň spočítána směrodatná odchylka. Nejmenší průměrnou povrchovou rezistivitu prokázaly vzorky s 1% obsahem mletých uhlíkových vláken, následované vzorky s 0,5% obsahem C – partikulí.

10. Závěr

V bakalářské práci byly zkoumány vlivy obsahu částic z namletých recyklovaných uhlíkových vláken na pevnost v tlaku a pevnost v ohybu s cílem určit optimální koncentraci C – partikulí v geopolymu. Geopolymer byl prezentován materiálem Baucis – produktem firmy České lupkové závody a.s. Nové Strašecí. Recyklovaná uhlíková vlákna byla získána z VZLÚ a.s. Praha. Je popsána příprava uhlíkových částic mletím, dále je popsána metoda konstrukce kompozitních materiálů na bázi geopolymu. Tyto materiály byly podrobeny zkouškám pevnosti v tlaku a ohybu, zároveň byly provedeny zkoušky elektrické rezistivity. Závislost naměřených veličin na koncentraci C – partikulí byla provedena lineární regresí. Ve výsledku experimentu bylo prokázáno, že optimální koncentrace přídavku mletých C vláken pro geopolymer Baucis je **2,93%** pro pevnost v tlaku a **3,28 %** pro pevnost v ohybu. Nejmenší el. rezistivitu prokázaly vzorky s 1% přidaných mletých uhlíkových vláken. Praktické využití výsledku práce lze spatřovat ve dvou oblastech:

- a) Využití recyklovaných uhlíkových vláken v kompozitních materiálech.
- b) Alternativní náhradě betonu.

Problematika využití C – vláken v kompozitních materiálech je natolik široká, že by bylo vhodné pokračovat ve výzkumu jejich dalšího využití.

11. Seznam použité literatury

- [1] Militký, J.: Textilní vlákna a speciální textilní vlákna. Učební texty TU Liberec 2005
- [2] Bareš, A.: Kompozity. AV ČR. Praha 1989
- [3] GRÉGR, J.: [online]. Povrchové vlastnosti uhlíkových vláken. 2004, [cit. 2011-04-03]. Dostupné z [www:](http://centrum.tul.cz/centrum/centrum/3Aplikace/3.1_zaverecne_zpravy/%5B3.1.09%5D.pdf) <http://centrum.tul.cz/centrum/centrum/3Aplikace/3.1_zaverecne_zpravy/%5B3.1.09%5D.pdf>.
- [4] Kořínek, Z.: [online]. Kompozity. [cit. 2011-02-23]. Dostupné z [www:](http://www.volny.cz/zkorinek/) <<http://www.volny.cz/zkorinek/>>
- [5] Tomková, B.: [online]. Textilní kompozity 2009 [cit. 2011-04-12] Dostupné z [www:](https://skripta.ft.tul.cz/databaze/list_aut.cgi?aut=32&skr=44&pro=>) <https://skripta.ft.tul.cz/databaze/list_aut.cgi?aut=32&skr=44&pro=>>.
- [6] Šorfa, J.: [online]. Historie žárovky. [cit. 2011-03-14]. Dostupné z [www:](http://www.pslib.cz/jan.sorfa/ukol_PVP/?ukaz=historie) <http://www.pslib.cz/jan.sorfa/ukol_PVP/?ukaz=historie>.
- [7] Laš, V.: Mechanika kompozitních materiálů. Přednáška č.6. ZČU Plzeň 2004
- [8] Michna, Š.: [online]. Kompozitní materiály [cit. 2011-04-02]. Dostupné z [www:](http://www.stefanmichna.com/download/technicke-materialy_II/kompozitni_materialy.pdf) <http://www.stefanmichna.com/download/technicke-materialy_II/kompozitni_materialy.pdf>.
- [9] Jančář, J.: Úvod do materiálového inženýrství kompozitů Brno, VUT, FCH, 1999. [cit. 2011-04-14].
- [10] Ehrenstein, G.W.: Polymerní kompozitní materiály, Scientia 2006
- [11] Kolektiv autorů FSV ČVUT.: [online]. Kompozitní materiály. Praha, ČVUT, FSV 2008.[cit.2011-04-15]. Dostupné z [www:](http://tpm.fsv.cvut.cz/vyuka/main/MI11.pdf) <<http://tpm.fsv.cvut.cz/vyuka/main/MI11.pdf>>.
- [12] Legendre, A.: Uhlíkové materiály: Od černé keramiky k uhlíkovým vláknům. Praha: Informatorium 2001.
- [13] Časopis Transfer 9/2009 [online]. VZLÚ a.s. Praha Letňany. [cit. 2011-03-09]. Dostupné z [www:](http://www.vzlu.cz/cz/publikace/casopis-transfer/rocnik-2009) <<http://www.vzlu.cz/cz/publikace/casopis-transfer/rocnik-2009>>.
- [14] Časopis Transfer 7/2008 [online]. VZLÚ a.s. Praha Letňany. [cit. 2011-03-13]. Dostupné z [www:](http://www.vzlu.cz/cz/publikace/casopis-transfer/rocnik-2008) <<http://www.vzlu.cz/cz/publikace/casopis-transfer/rocnik-2008>>.
- [15] Časopis Transfer 3/2007 [online]. VZLÚ a.s. Praha Letňany. [cit. 2011-03-13]. Dostupné z [www:](http://www.vzlu.cz/cz/publikace/casopis-transfer/rocnik-2007) <<http://www.vzlu.cz/cz/publikace/casopis-transfer/rocnik-2007>>.
- [16] Sodomka, L.: Uhlíková vlákna. Výzkumná zpráva VŠST Liberec 1995.

- [17] IMateriály [online]. 2007-2008 [cit. 2011-04-28]. Polymerní vláknové kompozity . Dostupné z www: <<http://www.imaterialy.cz/clanky/plasty-pro-architekturu-astavebnictvi-6-recyklace-plastu/2967/plasty-pro-stavebnictvi-a-architekturu-7-polymernivlaknove-kompozity/>>.
- [18] Huťa J.: Příprava a vlastnosti geopolymérů na bázi metakaolinu alkalickou aktivací. Diplomová práce. [cit. 2011-03-27] Brno: VUT, FCH 2005.
- [19] Alkalicky aktivované materiály geopolymery [online]. Dostupné z www: <http://www.vscht.cz/sil/pojiva/geo_2007.pdf>.
- [20] Long,P.V. et al: Geosynthetics reinforcement application for tsunami reconstruction: Evaluation of interface parameters with silty sand and weathered clay. Geotextiles and Geomembranes. Volume 25, Issues 4-5, August-October 2007, Pages 311-323
- [20] Antoš, P., Koutník, P.: Alkalické aktivátory metakaolinu. In: Metakaolin 2008, Sborník příspěvků semináře. Brno, 2008, 5-10s.
- [22] Opravil, T., Brandštetr, J., Havlica J., Frank, V.: Geopolymery na bázi metakaolinu aktivovaného sodnými a draselnými sloučeninami. In: Metakaolin 2008, Sborník příspěvků semináře. Brno, 2008, 80-86 s.
- [23] Fečko, P., Kušnierová, M., Lyčková, B., Čáblík, V., Farkašová, A.: Popílký, Ostrava 2003 [cit.2011-04-28].
- [24] Bartoňová, P., Příprava lehkých kompozitů na bázi metakaolinu a energosádrovce. Bakalářská práce. Brno VUT, FCH, 2007.
- [25] Silberangel, A.: Nauka o materiálu I. VŠB – TU Ostrava 2005.

